



## REHABILITACIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS DOCENTES SUPERIORES

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Fundamentos de la Arquitectura  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Curso 2018-19

Autor: Fernando Ruiz Menchén  
Tutor: Ángel Luís León Rodríguez\_TFG B





## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por apoyarme y no dejar que tirase la toalla, y a mi familia de la ETSA, por hacer divertidos los momentos difíciles de la carrera y mejorar los buenos.

Gracias.

INTRODUCCIÓN.....	04
Resumen.....	05
Palabras clave.....	05
Summary.....	06
Keywords.....	06
Motivación.....	07
Acrónimos utilizados.....	08
 MARCO TEÓRICO.....	 09
Introducción.....	09
Eficiencia energética.....	09
Demanda energética.....	09
Confort térmico.....	10
 ESTADO DEL ARTE .....	 11
Introducción.....	11
Índices de confort térmico.....	11
Normativa.....	12
Criterios de diseño.....	13
Medidas pasivas de rehabilitación.....	15
Demanda energética.....	16
Conclusiones.....	17
 OBJETIVOS.....	 18
General.....	18
Específicos.....	18
 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	 19
Introducción.....	19
Caso de estudio.....	19
Monitorización de las condiciones ambientales.....	20
Análisis de las condiciones actuales del caso de estudio.....	20
Elaboración de un modelo de simulación.....	21
Validación del modelo de simulación.....	21
Propuestas pasivas de rehabilitación energética.....	22
Análisis de las condiciones de rehabilitación energética del caso de estudio.....	22



ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO.....	23
Introducción.....	23
Caracterización del caso de estudio.....	23
Geometría y característica espaciales.....	23
Características constructivas.....	24
Ocupación del aula.....	25
Monitorización de las condiciones ambientales.....	25
Análisis de las condiciones actuales.....	26
Creación de un modelo de simulación.....	27
Creación del modelo geométrico en 3D.....	27
Asignación de valores reales.....	28
Realización de la primera simulación.....	28
Validación del modelo.....	32
Propuestas pasivas de rehabilitación energética.....	35
Hipótesis 1.....	35
Hipótesis 2.....	36
Hipótesis 3.....	36
Hipótesis 4.....	36
Análisis del modelo mejorado.....	37
 CONCLUSIONES.....	43
Conclusiones generales.....	43
Líneas futuras de estudio.....	44
 ANEJO.....	45
Mediciones.....	45
Primera simulación.....	51
Modelo validado.....	57
Modelo mejorado.....	63
 BIBLIOGRAFÍA.....	67
Libros.....	67
Artículos.....	67
Normativas.....	67
Páginas web.....	68

## Resumen

Este trabajo pretende analizar el comportamiento energético de los edificios docentes de enseñanza superior ubicados en clima mediterráneo, partiendo de un caso de estudio lo más representativo posible, que permita extrapolar las conclusiones y resultados obtenidos a otros edificios de características similares.

El objetivo principal de este trabajo es avanzar en el conocimiento del comportamiento energético de este tipo de edificios, con el fin de reducir la demanda y el consumo energético de los mismos, así como valorar y mejorar el confort térmico de sus usuarios. Además, el trabajo también se dirigirá al ámbito de la rehabilitación energética de los edificios docentes de enseñanza superior, un vez conocidas sus necesidades, defectos y posibles soluciones a partir de su comportamiento térmico actual.

El estudio se centrará exclusivamente en la utilización de técnicas pasivas de acondicionamiento, las cuales se comprobarán mediante la utilización del soporte informático "Design Builder", programa que permite comprobar y simular diferentes situaciones ambientales y energéticas, para evaluar aspectos como el confort térmico, la eficiencia energética, etc...

Para el desarrollo de esta investigación se tomará como caso de estudio un aula situada en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla (más concretamente, el aula 4.08), ya que se trata de un espacio que representa las características generales de un aula tipo y, además, posee una serie de singularidades que la hacen ser un aula más desfavorable, térmicamente hablando, en cuanto a que está orientada al sur, está situada en una ciudad de clima B4, su cerramiento carece de aislamiento o que su capacidad de alumnos es reducida debido al modelo de enseñanza de Bolonia y de la ETSAS.

El estudio partirá del análisis de las condiciones actuales de este espacio, mediante la monitorización de las variables ambientales en condiciones reales de utilización, para valorar su comportamiento y validar los modelos de simulación que, posteriormente, se utilizarán para analizar la influencia de diferentes soluciones pasivas de acondicionamiento.

### Palabras clave:

- Confort térmico.
- Demanda energética.
- Design Builder.
- Edificios docentes.
- Eficiencia energética.
- Rehabilitación energética.
- Simulación Energética.

### Summary

The following work aims to analyze the energy performance of higher education teaching buildings located in a mediterranean climate, based on a case study as representative as possible, which allows extrapolating the conclusions and results obtained to other buildings of similar characteristics.

The main objective is to advance in the knowledge of the energetic behavior of this type of buildings, in order to reduce the demand and the energetic consumption of this type of buildings, as well as to value and improve the thermal comfort of its users. In addition, the work will also be aimed at the field of energy rehabilitation of higher education teaching buildings, once known their needs, defects and possible solutions from their current thermal behavior.

The study will focus exclusively on the use of passive conditioning techniques, which will be verified by using the computer support "Design Builder", a program that allows to check and simulate different environmental and energy situations, to evaluate aspects such as thermal comfort, energy efficiency, etc...

For the development of this research will be taken as a case study a classroom located at the School of Architecture of the University of Seville (more specifically, the classroom 4.08), since it is a space that represents the general characteristics of a classroom type and, in addition, it has a series of singularities that make it a more unfavorable classroom, speaking in thermal terms, as for of being oriented to the south, it is located in a city of climate B4, its enclosure lacks isolation or its capacity of students is reduced due to the teaching model of Bologna and the ETSAS.

The study will start from the analysis of the current conditions of this space, through the monitoring of environmental variables in real conditions of use, to assess their behavior and validate the simulation models that, subsequently, will be used to analyze the influence of different passive solutions of conditioning.

#### Key words:

- Design Builder.
- Educational buildings.
- Energy demand.
- Energy efficiency.
- Energy rehabilitation.
- Energy simulation.
- Thermal comfort.

## Motivación

La motivación de realizar este Trabajo de Fin de Grado sobre este tema se puede resumir en dos aspectos que tienen gran relevancia en la actualidad: el primero, debido al papel que ejerce hoy en día el ahorro energético y la sostenibilidad en nuestra sociedad, y el otro, debido a la ya demostrada importancia que tienen las condiciones de confort térmico en espacios de trabajo o aprendizaje, como lo son los edificios docentes.

Actualmente, nos encontramos en un momento en el que la sostenibilidad, el medio ambiente y las energías renovables son aspectos muy trascendentes y de una gran importancia. La energía ya no se concibe como un recurso ilimitado, el cual podamos utilizar sin control y sin consecuencias, sino todo lo contrario, cada vez se ve más cercana la necesidad de implantar otros modelos de consumo y producción de energía. Sin ir más lejos, existen ya leyes que ponen límite a este derroche energético con vistas al futuro. Por ejemplo, la Directiva 2010/31/UE <sup>(1)</sup>, establece como fecha límite el 31 de diciembre de 2020, para que los edificios de nueva planta sean de consumo de energía casi nulo y, además, que los edificios públicos de nueva construcción sean edificios de consumo de energía casi nulo a partir del 31 de diciembre de 2018.

Es bien conocido que nuestro planeta sufre las consecuencias de un empleo abusivo, incorrecto e innecesario de las fuentes y de los sistemas de producción y utilización de energía de los que hoy en día disponemos. El uso descontrolado de estas energías produce emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases nocivos para el medio ambiente, que a su vez provocará la futura escasez de estas fuentes energéticas que utilizamos.

Además, también nos encontramos inmersos, desde hace unos años, en una época de crisis económica a nivel mundial, en la cual el ahorro es lógico y necesario. Por lo tanto, podríamos concluir que ahorrar en energía mediante un uso controlado y eficiente de la misma, o incluso prescindiendo de ella, sería algo que contribuiría a mejorar y en hacer más sostenible tanto el planeta como la sociedad.

Por otro lado, el motivo por el cual este estudio energético está enfocado en los edificios docentes es debido a la importancia del confort térmico en los mismos. Existen diversos estudios que aseguran que el ambiente térmico y las condiciones de confort en espacios dedicados al trabajo o durante el proceso docente es vital para que el desarrollo del mismo sea fructífero, asociándose el confort térmico a una mejor concentración y disposición para un buen rendimiento de trabajo y de docencia <sup>(2)</sup>.

Por lo tanto, es por todo esto que creo necesario, importante e interesante, el conocimiento y la investigación acerca del ámbito del confort térmico y la eficiencia energética en los edificios docentes, ya que, además de ser solución de los problemas anteriormente mencionados, como son la limitación de las fuentes de energía, la crisis económica o la mejora de las condiciones docentes, por ser, en mi opinión, un valor que, pensado durante el proceso proyectual de creación de un arquitecto, puede ser una base suficientemente justificada e interesante para crear arquitectura, así como para crear modelos bases que se puedan extrapolar y que garanticen el confort térmico mediante técnicas pasivas.

<sup>(1)</sup> - Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, (2010).

<sup>(2)</sup> - INSHT, (1991), NTP 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT.

### Acrónimos utilizados

Los acrónimos utilizados en este trabajo son los siguientes:

ACS: Agua Caliente Sanitaria

BOE: Boletín Oficial del Estado

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

CTE: Código Técnico de la Edificación

DB: Documento Básico

ETSA: Escuela Técnica Superior de Arquitectura

ETSAS: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

HE: Ahorro de Energía

HR: Humedad Relativa

HVAC: Calefacción, ventilación y aire acondicionado (por sus siglas en inglés)

HVAC: Notas Técnicas de Prevención

PDD: Porcentaje Previsto de Insatisfechos

PMV: Voto Medio Previsto

PPM: Partes Por un Millón

RD: Real Decreto

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

UE: Unión Europea

UNE: Asociación Española de Normalización

US: Universidad de Sevilla

## Introducción

Antes de nada, conviene comenzar definiendo brevemente unos conceptos básicos, y a veces equívocos, sobre los que se va a tratar en este trabajo. Como bien se ha dicho anteriormente, el confort térmico, la eficiencia energética y la reducción de la demanda, son los objetivos básicos a alcanzar cuando pretendemos aplicar los resultados de un estudio energético.

## Eficiencia energética

La eficiencia energética se define como la utilización de la energía de tal manera que realice su función lo mejor posible, aprovechando todo su potencial, es decir, menor consumo, mayor rendimiento. Por ejemplo, "un aparato, proceso o instalación es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una actividad. Una persona, servicio o producto eficiente [...], además de necesitar menos energía para realizar el mismo trabajo, también busca abastecerse, si no por completo, con la mayor cantidad posible de energías renovables." <sup>(3)</sup>

La eficiencia energética busca, por tanto, reducir el consumo energético de los edificios. Además, como fin último, pretende contribuir a la protección y conservación del medio ambiente, reduciendo al máximo las emisiones producidas por el consumo de energía. En esta búsqueda por reducir el consumo de energía de los edificios, se utilizará la denominada ecuación fundamental de la eficiencia energética, que relaciona la demanda, el rendimiento y el consumo de energético.

$$C = \frac{D}{\eta}$$

Donde "C" es el consumo energético, "D" la demanda y "η" el rendimiento.

## Demanda energética

Podría deducirse del apartado anterior que la demanda energética es el valor que resulta de multiplicar el consumo de energía real por el factor de rendimiento del sistema que la produce. En otras palabras, la demanda energética de un edificio "es la energía que éste requiere para que en su interior un usuario pueda disfrutar de unas determinadas condiciones de confort. Esta energía incluirá la energía necesaria para la calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de ACS y la iluminación." <sup>(4)</sup>

Por lo tanto, podemos deducir que: cuanto menor sea la demanda de un edificio, o cuanto mejor sea el rendimiento de sus instalaciones, menor será el consumo energético. Esta reducción de la demanda puede conseguirse mediante la mejora del rendimiento de las instalaciones térmicas o, en el caso que del estudio, mediante técnicas pasivas de acondicionamiento.

En España, la demanda energética se encuentra regulada por el CTE, que en su apartado DB - HE - 1 establece que "la demanda energética de los edificios se limita en función de la zona climática de la localidad en que se ubican y del uso previsto." <sup>(5)</sup>

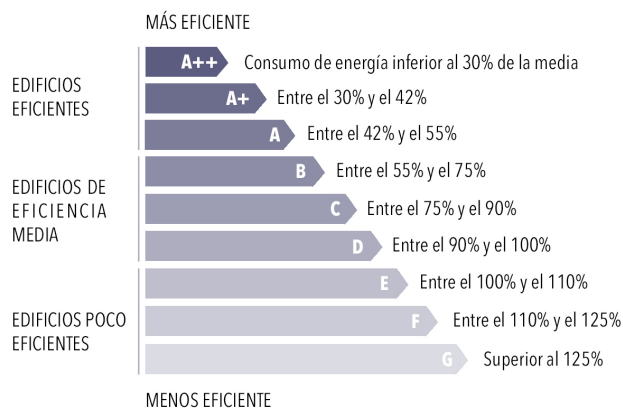


FIGURA 01. Esquema de la eficiencia energética. Figura elaborada por autor.

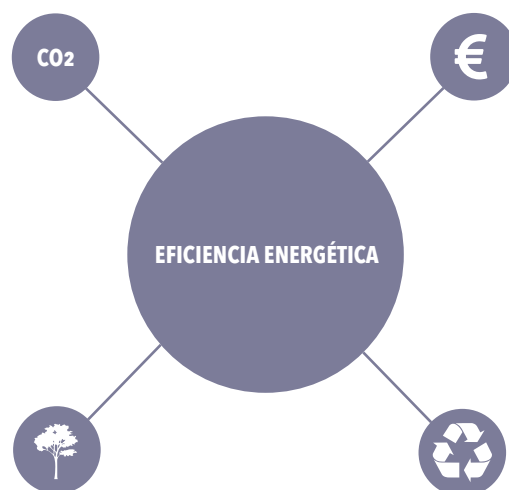


FIGURA 02. Esquema conceptual de los ámbitos relacionados con la eficiencia energética de los edificios. Figura elaborada por autor.

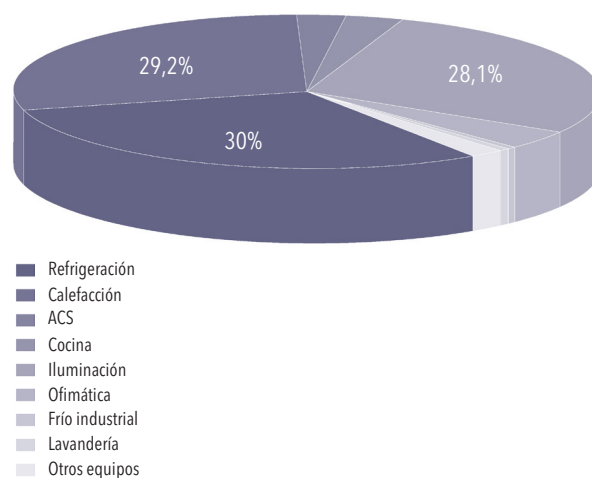


FIGURA 03. Consumo energético de edificios terciarios. Fuente: IDAE, 2009. Figura editada por autor.

<sup>(3)</sup> - Factorenergía, (06/02/2017), párrafo 3.

<sup>(4)</sup> - Raquel Hoyos López, (2014), página 16.

<sup>(5)</sup> - CTE-DB-HE-1, (2017), página 13.

CONDICIONES	INVERNALES	VERANIEGAS
Temperatura operativa	20 - 24 °C	23 - 26 °C
Velocidad del aire	< 0,15 m/s	< 0,25 m/s
Humedad relativa	50%	50%
Resistencia térmica del vestido	1 clo	0,5 clo

TABLA 01. Condiciones para el confort térmico según la UNE EN ISO 7730: 2006.  
Fuente: INSHT. Tabla modificada por autor.

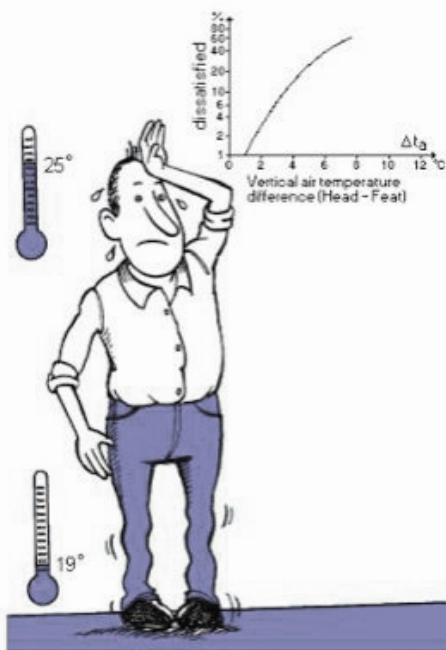


FIGURA 04. Ilustración de la diferencia de temperatura vertical. Fuente: Bjørn Kvisgaard - "Thermal Comfort", traducido por Manuel Martín Monroy, (2000). Figura editada por autor.

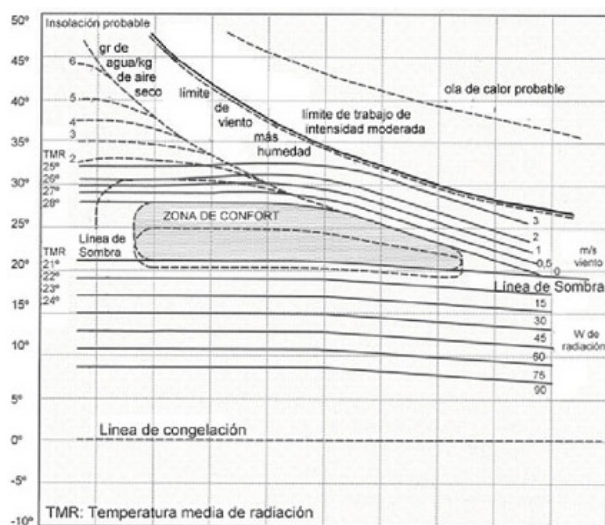


FIGURA 05. Carta bioclimática de Olgay. Fuente: www.construmatica.com

## Confort térmico

El confort térmico es un concepto o sensación totalmente subjetiva, ya que depende de la edad, del sexo, de la complexión física o de la actividad que esté realizando una persona y que "depende del calor producido por el cuerpo y de los intercambios entre éste y el medio ambiente" <sup>(6)</sup>. Es una situación que resulta muy difícil medir o asignarle algún valor determinado, ya que no deja de ser una sensación de estabilidad entre frío y calor, algo de lo que cada persona puede tener una percepción totalmente diferente.

No obstante, en la normativa UNE-EN-ISO-7726:2001 <sup>(7)</sup>, se establecen unos valores que se utilizan como guías o estándares, mediante los cuales se garantiza el confort térmico para los usuarios de un edificio, en función de múltiples factores como pueden ser: la estación del año, el tipo de actividad física que se realice, la cantidad de ropa que se lleve, etc.

Según la norma UNE-EN-ISO-7730:2006, el confort térmico se define como "una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico" <sup>(8)</sup>, y las condiciones para que esta situación se produzca son las establecidas en la Tabla 01.

Los factores que influyen en la generación de una situación de confort o bienestar térmico son, como ya se ha dicho anteriormente, muy variadas y subjetivas. Según varios estudios, estos factores y "las variables que afectan a la disipación térmica del cuerpo y, por tanto, al confort térmico se pueden agrupar en tres categorías" <sup>(9)</sup>:

- Ambientales:

- Temperatura del aire
- Movimiento del aire
- Humedad del ambiente
- Radiación
- Calidad del aire

- Personales:

- Tasa metabólica (actividad)
- Vestimenta

- Adicionales:

- Procesos digestivos y nivel de hidratación
- Aclimatación al ambiente
- Forma del cuerpo
- Grasa subcutánea
- Edad y género
- Estado de salud

- Subjetivos:

- Naturalidad
- Expectativas y experiencia
- Periodo de exposición
- Percepción de control

<sup>(6)</sup> - INSHT, ERGA - Noticias/4, número 99, (2007).

<sup>(7)</sup> - UNE-EN-ISO-7726, (2001).

<sup>(8)</sup> - UNE-EN-ISO-7730, (2006).

<sup>(9)</sup> - Auliciems, A., Szokolay, S. (1997); Matias, L. (2010).



## Introducción

Una vez establecidas estas tres definiciones básicas anteriores, se procede a, como es costumbre en cualquier desarrollo de un trabajo de investigación, desarrollar un marco teórico en el cual este trabajo se apoyará tanto como para establecer las bases de conocimiento acerca del tema en cuestión, como para tener una referencia estructural de trabajo.

En este trabajo se han utilizado como referencias diversos estudios, normativas, libros y publicaciones que tratan el tema del confort térmico y la eficiencia energética y medidas pasivas de acondicionamiento térmico, intentando siempre focalizar estos temas hacia el ámbito de los edificios docentes.

Este apartado referente al estado del arte se ha estructurado en 5 apartados que abarcan las nociones básicas necesarias para conocer el ámbito teórico de los temas sobre los que trata este trabajo. Se hablará, por tanto, sobre confort térmico, normativa, criterios de diseño, demanda y eficiencia energética y medidas pasivas en edificios docentes.

## Índices de confort térmico

En las aulas docentes, como en cualquier local habitable en el que se realice una actividad de tipo sedentaria o ligera, es necesario establecer unas condiciones de confort térmico, que posibiliten y ayuden al desarrollo de la actividad a realizar.

Por otro lado, el RD 486/1997<sup>(10)</sup>, que contiene las disposiciones mínimas para la seguridad y la salud en los espacios de trabajo, establece unos valores límite de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire que garantizan el confort térmico en espacios cerrados con este tipo de actividad. No obstante, estos no son los únicos valores que influyen en el confort térmico, ya que la sensación de confort térmico es una apreciación muy personal y subjetiva.

Povl Ole Fanger<sup>(11)</sup>, que fue un ingeniero danés y un estudioso en el ámbito del confort térmico, elaboró un método que utilizaba los denominados índices térmicos PMV (Voto Medio Previsto o Voto Medio Estimado, proveniente del inglés) y PPD (Porcentaje Previsto de Insatisfechos o Porcentaje Estimado de Insatisfechos, proveniente del inglés). Se trata de un método objetivo que, mediante la medición de los cuatro parámetros ambientales, como son, la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire y la humedad relativa, la estimación del aislamiento de la vestimenta y la determinación de la tasa metabólica del trabajo que se realiza, asigna un valor numérico a esos indicadores, que ayudarán a predecir la sensación de bienestar térmico global o general que pueden tener los usuarios de un edificio.

Fanger elaboró su método mediante diferentes pruebas que realizó con un grupo de más de 1300 personas. De este modo, creó unas relaciones matemáticas entre su sensación térmica general, expresada con un número en una escala numérica de sensación térmica, y los datos medidos de los cuatro parámetros ambientales mencionados anteriormente, teniendo en cuenta, además, la ropa y la actividad.

PUNTUACIÓN	SENSACIÓN TÉRMICA
+3	Mucho calor
+2	Bastante calor
+1	Algo de calor
0	Neutra
-1	Algo de frío
-2	Bastante frío
-3	Mucho frío

TABLA 02. Escala Fanger para medir la sensación térmica. Tabla elaborada por autor

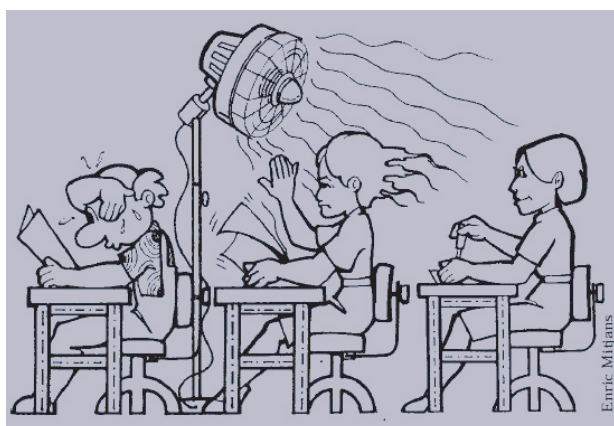


FIGURA 06. Representación de las diferentes sensaciones térmicas en un espacio. Fuente: INSHT. Figura editada por autor

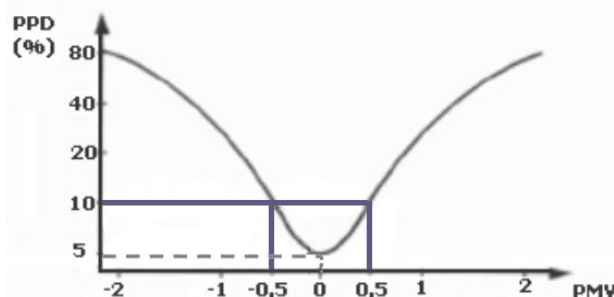


FIGURA 07. Gráfica de Fanger que relaciona el PPD y el PMV. Las líneas moradas representan los valores recomendados. Fuente: INSHT. Figura editada por autor

<sup>(10)</sup> - Real Decreto 486/1997, (14 de abril, 1997), página 12.923.

<sup>(11)</sup> - Fanger, P. Ole, (1970).



	R.D. 486/97 L.T. (Condiciones ambientales de los locales cerrados)	R.D. 1751/1998 RITE (Condiciones de diseño de las instalaciones térmicas)	R.D. 1027/2007 RITE (Condiciones de diseño de las instalaciones térmicas)
HUMEDAD RELATIVA (%)	30 - 70	40 - 60	Verano: 45 - 60 Invierno: 40 - 50
	Con electricidad estática 50 - 70		
TEMPERATURA (°C)	Trabajos sedentarios: 17 - 27 (*)	-	-
	Trabajos ligeros: 14 - 25		
TEMPERATURA OPERATIVA (°C)	-	Verano: 23 - 25 Invierno: 20 - 23	Para PPD<10%; M=1,2 met; una ropa de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno: Verano: 23 - 25 Invierno: 21 - 23
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	Trabajos sedentarios:	Verano: 0,18 - 0,24 Invierno: 0,15 - 0,20	Calcular en función de la temperatura del aire, la intensidad de turbulencia y tipo de difusión del aire
	Amb. calurosos: ≤ 0,5		
	Amb. no calurosos: ≤ 0,25		
	Trabajos no sedentarios:		
	Amb. calurosos: ≤ 0,75		
	Amb. acondicionado: ≤ 0,75		

FIGURA 08. Disposiciones mínimas de la normativa para el bienestar térmico en espacios de trabajo de actividad sedentaria. Fuente: INSHT. Figura editada por autor

1. PARA CONSEGUIR UN BIENESTAR TÉRMICO GLOBAL CON UN PPD<10%			
Temperatura operativa	Invierno (época calefacción)	20 °C - 24 °C (si se lleva ropa de 1 clo)	
	Verano (época refrigeración)	23 °C – 26 °C (si se lleva ropa de 0,5 clo)	
Velocidad del aire		< 0,1 m/s	
2. PARA CONSEGUIR BIENESTAR LOCAL CON UN PD < 5% (apartados a y c) Y UN PD< 10% (apartado b)			
a.	Diferencia entre la temperatura del aire a la altura de la cabeza (1,1 m del suelo) y a la de los tobillos (0,1 m del suelo)	< 3 °C	
b.	Rango de temperatura del suelo	De 19 °C a 29 °C	
c.	Asimetría de Temperatura radiante	Debida a un techo caliente	< 5 °C
		Debida a una pared/ventana fría	< 10 °C
		Debida a un techo frío	< 14 °C
		Debida a una pared/ventana caliente	<23 °C
3. PARA EL BIENESTAR TÉRMICO Y PARA EVITAR LA EXCESIVA HUMEDAD DE LA PIEL Y LA SEQUEZAD DE LA PIEL Y LAS MUCOSAS			
Humedad relativa del aire		30% - 70%	

FIGURA 09. Recomendaciones para el bienestar térmico en espacios de trabajo de actividad sedentaria. Fuente: INSHT. Figura editada por autor

IDA 1	Aire de óptima calidad: hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
IDA 2	Aire de buena calidad: oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables y piscinas.
IDA 3	Aire de calidad media: edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores.
IDA 4	Aire de calidad baja: no se debe aplicar

TABLA 03. Categorías del aire interior en función del uso de los edificios. Fuente: RITE - Generación de calor, (2007)

Por lo tanto, el PMV nos proporciona el dato de la media de los votos, acerca del confort térmico, de las personas que ocupan un mismo espacio y están expuestas a las mismas condiciones térmicas ambientales, realizan la misma actividad física y llevan una ropa similar. Mientras que, el PPD, nos proporciona el porcentaje de personas insatisfechas, que no sienten confort térmico, asociado a un valor determinado de PMV. Se estableció cuantificando el porcentaje de personas que dieron puntuaciones positivas iguales o mayores de +2 y negativas iguales o menores de -2. No es posible conseguir unas condiciones térmicas que satisfagan a todo el mundo, es por eso que el método de Fanger tiene esto en cuenta, asignando un mínimo para el PPD del 5%, en el mejor de los casos, ya que supondría que el PMV fuese nulo.

## Normativa

Existen normativas que se utilizan para establecer criterios mínimos de confort, encaminadas hacia la búsqueda del bienestar térmico de sus usuarios. Tomando como referencia el método Fanger antes mencionado y teniendo en cuenta todos los factores objetivos que influyen en la sensación térmica general del cuerpo, la norma UNE - EN - ISO 7730:2006 establece unas disposiciones y recomendaciones básicas para alcanzar el confort térmico en edificios públicos. La forma de calcular el PMV que proponía Fanger resulta lenta y trabajosa, por eso, la norma UNE - EN - ISO 7730:2006 propone nuevas formas para el cálculo de este valor:

- "a) Usar un programa informático para resolver las ecuaciones. La norma contiene un programa en BASIC para ello.
- b) Utilizar tablas de valores de PMV, realizadas a partir de diversas combinaciones de actividad física, vestimenta, temperatura operativa y velocidad relativa del aire.
- c) Determinarlo directamente con un equipo provisto de un sensor integrador. (El sensor integra el valor de las variables ambientales; los valores del aislamiento de la ropa y la tasa metabólica habría que introducirlos manualmente en el instrumento)" <sup>(12)</sup>

Sin embargo, el PPD resulta fácil de calcular ya que es una simple relación de porcentajes, además de poder utilizar la gráfica de la Figura 07. La norma establece unos valores recomendados para PMV y PPD, los primeros, oscilando entre +0,5 y -0,5, preferiblemente 0, y el segundo, del 10%. Además, la norma también proporciona las condiciones necesarias para que se den esos valores.

Por otro lado, también existen unas disposiciones legales mínimas que hay que cumplir sobre el confort térmico, que nos ayudan a saber que condiciones ambientales tienen que tener los espacios de trabajo donde se va desempeñar una actividad de tipo sedentaria, como es el caso, y a diseñar las instalaciones térmicas de los edificios públicos. (Ver Figura 08)

Además, la norma UNE-EN 13779:2008 <sup>(13)</sup>, que se aplica al diseño y ejecución de los sistemas de ventilación y de acondicionamiento de aire de los edificios no residenciales, procura establecer unos índices de calidad del aire interior en función del tipo de edificio (ver Tabla 03).

<sup>(12)</sup> Armendáriz Pérez de Ciriza, P. (2006), página 8.

<sup>(13)</sup> - UNE-EN-193779, (2008).

Esta norma establece, además, una serie de directrices que se aplican, sobretudo, a los sistemas de ventilación mecánica. Mediante una clasificación de los distintos tipos de aire que pueden intervenir en un sistema de ventilación, la norma establece unos criterios a considerar para el dimensionado y el diseño de los sistemas de ventilación mecánicos de los diferentes edificios.

Para el cálculo de los caudales de aire exterior necesarios para la ventilación de un local, se tendrán en cuenta diversas cuestiones que harán que ésta se calcule de una manera u otra. El Documento de Generación de Calor del RITE, proporciona una serie de tablas que indican el método necesario para el cálculo. Para el caso de este trabajo, se debería utilizar la Tabla 04, situada a la derecha de esta página.

Finalmente, para cerrar este apartado, hay que comentar que también existen una serie de normas y recomendaciones para regular la calidad del ambiente de los espacios de un edificio relativo a la cantidad de  $\text{CO}_2$  que se acumula en los mismos.

Según algunos estudios <sup>(14)</sup>, si la cantidad de  $\text{CO}_2$  de un espacio supera las 800 - 1000 ppm, siendo el tiempo de exposición de los usuarios prolongado, se pueden producir malestares generales en éstos, tales como dolores de cabeza, ansiedad, cansancio o somnolencia.

El INSHT establece, en una de sus Notas Técnicas de Prevención, que "el valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) del INSHT para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm". <sup>(15)</sup>

Por otro lado, el CTE, en su Documento Básico de Salubridad, regula la acumulación de dióxido de carbono en los locales de las viviendas, estableciendo que "en los locales habitables de las viviendas debe aportarse un caudal de aire exterior suficiente para conseguir que en cada local la concentración media anual de  $\text{CO}_2$  sea menor que 900 ppm" <sup>(16)</sup>. Sin embargo, este documento no limita la concentración de este gas para locales de edificios no residenciales.

Por lo tanto, se puede concluir que, con una concentración de  $\text{CO}_2$  que esté por encima de las 800 ppm, se empieza a considerar que la calidad del ambiente es mala para el interior de un edificio público, siendo alarmante por su nocividad para la salud si supera las 1.000 ppm.

## Criterios de diseño

Si bien los índices PMV y PDD pueden ser utilizados para establecer las bases de un buen diseño de ambientes térmicos confortables, así como para la evaluación y el análisis de ambientes térmicos existentes, en este apartado se analizarán los criterios de diseño pasivo, de carácter espacial, técnico y material, que se establecen para alcanzar esas condiciones ambientales de bienestar térmico que buscaban los índices de confort.

Categoría	l/s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

TABLA 04. Método indirecto por ocupación para el cálculo del caudal de ventilación en locales donde las personas tengan una actividad metabólica de alrededor 1,2 met cuando la mayor parte de las emisiones contaminantes sean producidas por las personas. Fuente: RITE - Generación de calor, (2007)

CATEGORÍA	ESTADO TÉRMICO DEL CUERPO EN SU CONJUNTO	
	PMV	PPD (%)
A	$-0,2 < \text{PMV} < +0,2$	$< 6$
B	$-0,5 < \text{PMV} < +0,5$	$< 10$
C	$-0,7 < \text{PMV} < +0,7$	$< 15$

TABLA 05. Categorías de ambientes térmicos según los índices PMV y PPD. A: mejor calidad, B: calidad media, C: peor calidad. Fuente: INSHT. Figura editada por autor

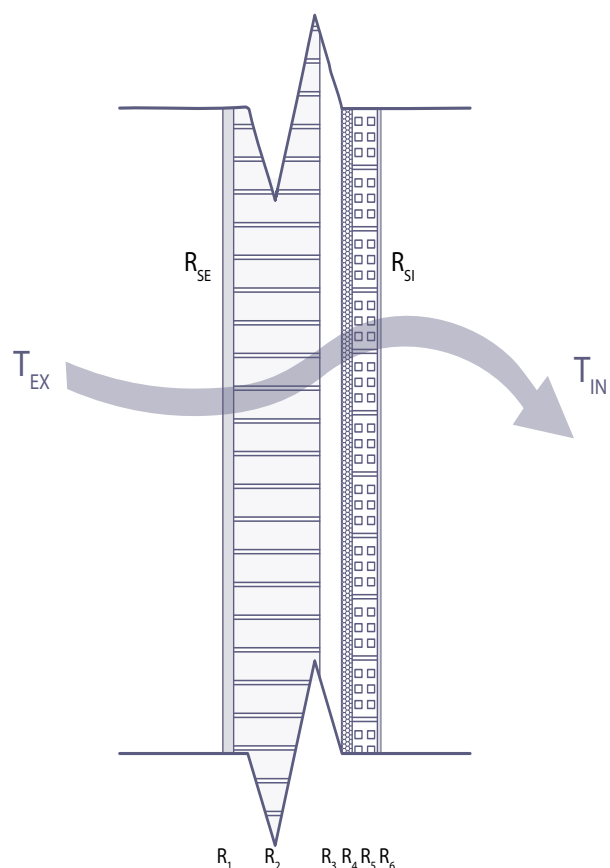


FIGURA 10. Fenómeno de la transmitancia térmica en un cerramiento tipo. Figura de elaboración propia

<sup>(14)</sup> - Melo, Torres, Hernández, Pantoja, (2016).

<sup>(15)</sup> - INSHT, (2000), NTP 549, pág. 1, párrafo 5.

<sup>(16)</sup> - CTE-DB-HS 3, (2017), pág. 61, apartado 2, párrafo 1.

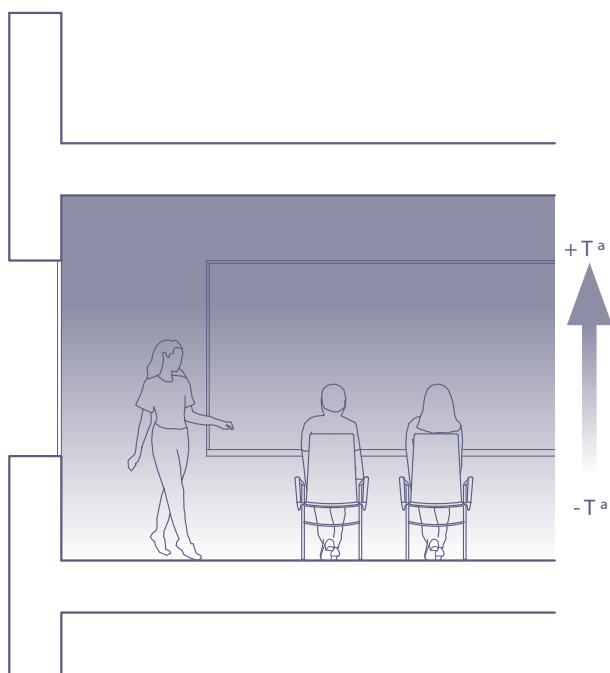


FIGURA 11. Fenómeno de diferencia vertical de temperatura en un espacio cerrado. Figura de elaboración propia.

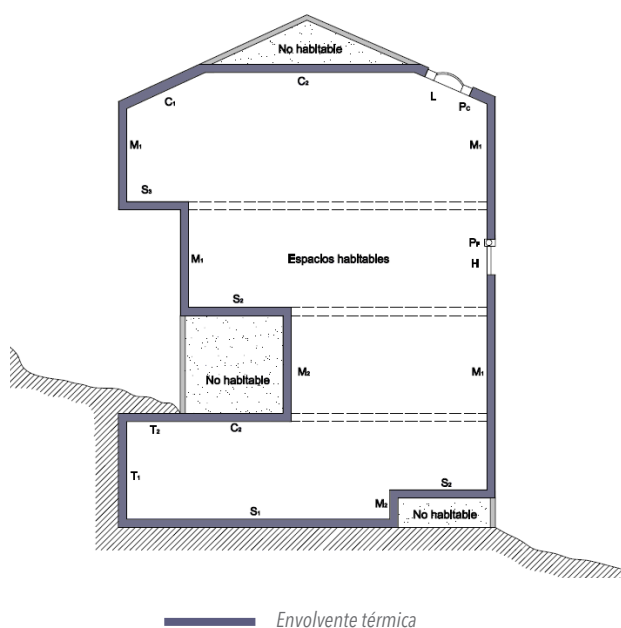


FIGURA 12. Esquema de la envolvente térmica de un edificio. Fuente: [www.elcertificador.com](http://www.elcertificador.com)

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo establece, en una de sus Notas Técnicas de Prevención <sup>(17)</sup>, una serie de criterios y recomendaciones para el diseño de ambientes para que sean confortables térmicamente. La calidad de un ambiente interior se caracteriza básicamente por la calidad del aire, por la temperatura interior, por la calidad lumínica, acústica y por la del entorno visual del espacio interior.

Los aspectos, relativos a los criterios de diseño, más importantes a tener en cuenta para el diseño de cualquier espacio a nivel ambiental son los siguientes:

- El uso al que irá destinado el espacio.
- La delimitación de la zona ocupada.
- El número de usuarios (ocupación mínima, media y máxima).
- El clima exterior (valores máximos y mínimos).
- El porcentaje de huecos respecto a totalidad de la fachada del local.
- El área de la superficie acristalada.
- La carga térmica originada por los usuarios, los equipos, la iluminación, la radiación solar, etc.
- La transmitancia térmica del cerramiento.
- La envolvente térmica y la existencia de puentes térmicos.
- El factor de forma del edificio.
- La posibilidad del uso de elementos de protección solar, si fuese necesario.
- La posibilidad de incorporar ventanas practicables para mejorar la ventilación.

Hay que tener en cuenta que, a pesar de establecer unos buenos criterios de partida para crear un ambiente confortable, una variación simple, como puede ser la variación de la carga térmica por el aumento de equipos informáticos o por un cambio de la ocupación, puede alterar la sensación de bienestar térmico del espacio. Por lo tanto, hay que tener muy presentes los factores que influyen o favorecen en la generación de insatisfacción o incomodidad térmica de los usuarios de un espacio concreto. Estos factores pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- La existencia de corrientes de aire.
- La diferencia vertical de la temperatura del aire.
- La diferencia de temperatura entre los locales colindantes que genere convección.

<sup>(17)</sup> - INSHT, (1998), NTP 501: Ambiente térmico: infort térmico local.

Es por todo esto que, pensar en todos estos aspectos a la hora de diseñar un nuevo edificio o de rehabilitar térmicamente un edificio existente, es la base para establecer unas condiciones de confort de manera pasiva, ayudando, también, a que las instalaciones de climatización sean más eficientes y tengan un consumo mucho menor de lo que tendrían si no se tuviesen en cuenta.

Sin embargo, a pesar de existir unos criterios de diseño para conseguir establecer unos buenos índices de PMV y PDD, no existen pautas específicas o exactas a nivel general para el diseño correcto de los espacios, ya que es algo que depende estrictamente del clima del lugar, de la orientación del edificio, de su altura, ocupación, etc.

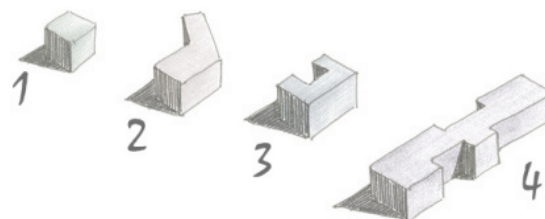


FIGURA 13. Esquema del factor de forma que representa las formas básicas más adecuadas de los edificios para los diferentes climas. 1. Clima frío, 2. Clima templado, 3. Clima cálido seco, 4. Clima cálido húmedo. Fuente: [www.huellasdearquitectura.wordpress.com](http://www.huellasdearquitectura.wordpress.com). Figura editada por autor.

## Medidas pasivas de rehabilitación

Cuando hablamos de realizar medidas para mejorar las condiciones térmicas de un espacio, sin necesidad de utilizar instalaciones de acondicionamiento, hablamos de métodos o medidas pasivas de rehabilitación. Las medidas pasivas de rehabilitación son aquellas actuaciones que procuran reducir la demanda energética de los edificios sin necesidad de modificar sus instalaciones. Éstas, se enfocan y se realizan, en general, en la envolvente térmica del edificio, pretendiendo mejorar sus infiltraciones y su renovación de aire.

Los métodos pasivos de acondicionamiento tienen la ventaja, frente a los activos, de no necesitar maquinaria o energía para cumplir su fin. Además, tienen un mantenimiento bajo o nulo, dependiendo del tipo, y un periodo de vida mucho más largo que cualquier tipo de elemento activo de climatización.

Existen diversos tipos de métodos pasivos para mejorar el funcionamiento energético de los edificios, que varían en eficacia, facilidad de aplicación, precio, etc.

Entre todas las diferentes medidas pasivas de rehabilitación energética, las principales y más comunes son <sup>(18)</sup>:

- Aislamiento de fachadas.
- Aislamiento de cubierta.
- Mejora de los huecos de fachada.
- Elementos de protección solar.
- Reducción de las infiltraciones de aire.
- Renovación del aire.
- Aislamiento de tuberías.

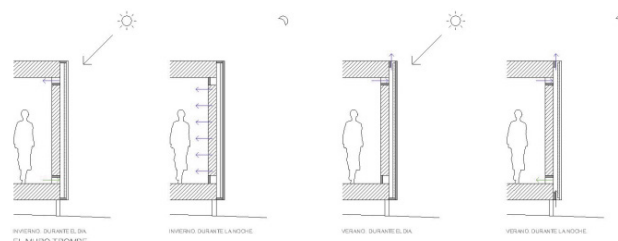


FIGURA 14. Esquema de funcionamiento de un muro trombe. Fuente: [www.edificacionbioclimatica.wordpress.com](http://www.edificacionbioclimatica.wordpress.com). Figura editada por autor.



FIGURA 15. Lamas de aluminio para protección solar de fachadas. Fuente: <http://www.archiexpo.es>. Figura editada por autor

<sup>(18)</sup> - [www.campusenergia.com/blog/item/139-las-medidas-pasivas-de-ahorro-de-energia-en-edificios/](http://www.campusenergia.com/blog/item/139-las-medidas-pasivas-de-ahorro-de-energia-en-edificios/)

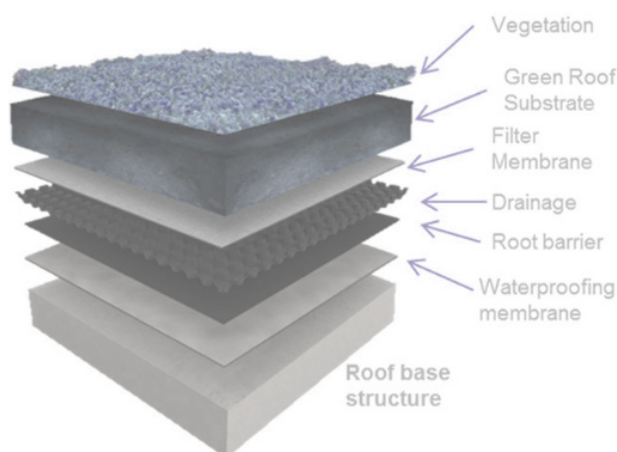


FIGURA 16. Detalle de una cubierta ajardinada. Fuente: [www.aipex.es](http://www.aipex.es). Figura editada por autor.

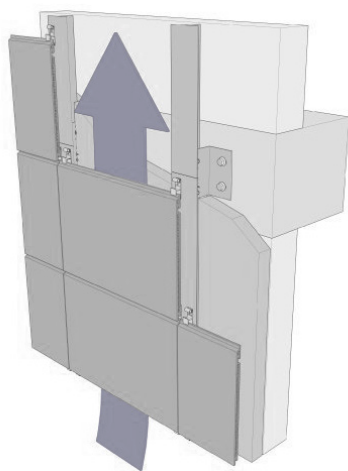


FIGURA 17. Esquema de una fachada ventilada. Fuente: [www.favemanc.com](http://www.favemanc.com). Figura editada por autor.

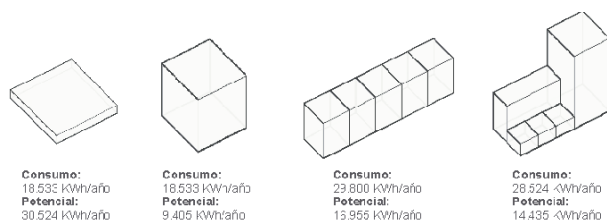


FIGURA 18. Relación entre la volumetría, la demanda energética y el potencial solar de un edificio. Fuente: Arellano, García, Guarachi, Nope - Análisis de Paramentos Solares activos en Establecimientos de salud, (2015).

Según Suárez, R. en "Impact of Climate Change: Environmental Assessment of Passive Solutions in a Single-Family Home in Southern Spain" de la revista Sustainability<sup>(19)</sup>, las medidas pasivas de rehabilitación de un edificio existente se podrían clasificar, por tanto, en tres diferentes grupos o tipos de soluciones, según el ámbito sobre el que se aplican. Éstas tres diferentes soluciones serían: soluciones para la envolvente térmica, soluciones de protección solar y soluciones de ventilación.

Las soluciones de tratamiento térmico de la envolvente puede ser de dos maneras diferentes. La primera, como medio para separar térmicamente el ambiente interior del exterior, es decir, como aislamiento térmico, y la segunda, el uso de la envoltura como elemento para capturar energía y suavizar los cambios de temperatura, lo que produce que aumente la inercia térmica.

En cuanto a la protección frente a la radiación solar, existen estrategias para evitar que ésta incida de manera perjudicial en los elementos de la envolvente. Entre estas medidas se incluyen la protección solar de ventanas, soluciones de doble piel de fachadas o techos ventilados, o el uso de cubiertas verdes, que además de aumentar la masa térmica, reducen la ganancia solar gracias a la reflexión y absorción que provoca la vegetación.

Además, la entrada de aire exterior puede contribuir a garantizar mejores condiciones de confort en el interior de un espacio. Ventilando por la noche, cuando las temperaturas exteriores disminuyen, se conseguirá ayudar a disipar el calor acumulado durante el día.

## Demanda energética

La demanda energética, como ya se ha mencionado anteriormente, es el valor que resulta de multiplicar el consumo de energía real por el factor de rendimiento del sistema que la produce. También se podría definir como "la energía útil que se necesita para conservar los requisitos de confort en su interior, según su uso y la zona climática"<sup>(20)</sup>.

Existen limitaciones para la demanda energética, aplicable a edificios de nueva construcción y en intervenciones o modificaciones de edificios existentes, las cuales están establecidas por el CTE-DB-HE-1<sup>(21)</sup>.

Este Documento Básico, se encarga de limitar la demanda energética de los edificios, de manera que cumplan con los requisitos básicos de ahorro de energía. Una vez cumplidos estos mínimos, es opcional aportar más medidas para procurar disminuir la demanda energética de las instalaciones y, por tanto, un aumento del ahorro de energía.

Esta normativa influirá directamente en el diseño de los nuevos edificios, sobretodo en lo que se refiere a materiales de los cerramientos, dimensiones, geometría, etcétera, y, por lo tanto, estará también directamente ligado las condiciones de confort térmico que se generarán en el interior de éstos. Además, también se limitan en esta norma la transmitancia de los cerramientos de los edificios, según su zona climática.

<sup>(19)</sup> - Suárez R., Escandón R., López-Pérez R., León-Rodríguez Á.L., Klein T., Silvester S. (2018)

<sup>(20)</sup> - [www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/cte-he-1-limitacion-de-la-demanda-energetica](http://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/cte-he-1-limitacion-de-la-demanda-energetica)

<sup>(21)</sup> - CTE-DB-HE: Ahorro de Energía, (2017)



Existen diversas formas para cuantificar la demanda energética de los edificios, por ejemplo, según el uso de los mismos. El Código Técnico, en este Documento Básico, establece que “los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos”<sup>(22)</sup>. El CTE, además, establece una manera de calcular la demanda de un edificio a través de un programa informático denominado LIDER, donde se utiliza métodos y datos normalizados para asegurar el cumplimiento de la normativa.

Para el caso que nos ocupa, un edificio no residencial en una zona climática B4, la normativa aplica las limitaciones en la demanda y transmitancia de los elementos que se pueden deducir de las tablas que se adjuntan a la derecha de esta página.

## Conclusiones

Como hemos podido comprobar los apartados anteriores, hoy por hoy existen diversas pautas, normativas y recomendaciones para lograr establecer un ambiente de confort térmico en un espacio concreto, así como unas nociones básicas acerca de los criterios de diseño, mediante técnicas pasivas, de ese espacio, que hay tener en cuenta a la hora de diseñar un nuevo espacio o rehabilitar uno existente, para así poder variar y modificar las condiciones ambientales de partida y alcanzar aquellas que se están buscando obtener.

No obstante, como ya se ha mencionado, no existen tácticas o técnicas de diseño concretas y específicas para ello, al ser el fin perseguido algo que dependerá y variará según el lugar donde se ubique el edificio que se vaya a rehabilitar térmicamente o a construir de nueva planta. Únicamente, conocemos los valores de temperatura, humedad y velocidad del aire que son necesarios para el bienestar térmico de los usuarios de un espacio con una actividad física sedentaria.

Es por eso que este trabajo tratará de alcanzar la posibilidad de establecer unos criterios a seguir para desarrollar aulas en los edificios docentes superiores de Sevilla, a nivel específico, y en general para las zonas climáticas similares, que tengan unas condiciones de confort térmico en su interior, aumentando la eficiencia energética y disminuyendo la demanda.

Esto se hará mediante la elaboración del modelo de simulación que anteriormente se ha mencionado, para así estos criterios se puedan aplicar, a nivel general, a cualquier caso con características similares, e incluso, mediante la variación en el modelo de las características que dependen del lugar o de las características técnicas del edificio, se puedan aplicar a otros casos diferentes, en cualquier otro lugar.

Zona climática de verano	Carga de las fuentes internas			
	Baja	Media	Alta	Muy alta
1, 2	25%	25%	25%	10%
3, 4	25%	20%	15%	0%**

\* El cálculo debe efectuarse suponiendo para el edificio objeto y para el edificio de referencia una tasa de ventilación de 0,8 renovaciones/hora durante el periodo de ocupación

\*\* No debe superar la demanda límite del edificio de referencia

TABLA 06. Porcentaje de ahorro de la demanda energética conjunta de calefacción y refrigeración. Fuente: CTE-DB-HE-1.

Parámetro	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Transmitancia térmica de muros y elementos en contacto con el terreno <sup>(1)</sup> [W/m <sup>2</sup> ·K]	1,35	1,25	1,00	0,75	0,60	0,55
Transmitancia térmica de cubiertas y suelos en contacto con el aire [W/m <sup>2</sup> ·K]	1,20	0,80	0,65	0,50	0,40	0,35
Transmitancia térmica de huecos <sup>(2)</sup> [W/m <sup>2</sup> ·K]	5,70	5,70	4,20	3,10	2,70	2,50
Permeabilidad al aire de huecos <sup>(3)</sup> [m <sup>3</sup> /h·m <sup>2</sup> ]	≤ 50	≤ 50	≤ 50	≤ 27	≤ 27	≤ 27

TABLA 07. Transmitancia térmica máxima y permeabilidad al aire de los elementos de la envolvente térmica. Fuente: CTE-DB-HE-1.

Capital	Z.C.	Altitud
Albacete	D3	677
Alicante/Alacant	B4	7
Almería	A4	0
Ávila	E1	1054
Badajoz	C4	168
Barcelona	C2	1
Bilbao/Bilbo	C1	214
Burgos	E1	861
Cáceres	C4	385
Cádiz	A3	0
Castellón/Castelló	B3	18
Ceuta	B3	0
Ciudad Real	D3	630
Córdoba	B4	113
Coruña, La/ A Coruña	C1	0
Cuenca	D2	975
Gerona/Girona	D2	143
Granada	C3	754
Guadalajara	D3	708
Huelva	A4	50
Huesca	D2	432
Jaén	C4	436
León	E1	346
Lérida/Lleida	D3	131
Logroño	D2	379
Lugo	D1	412
Madrid	D3	589
Málaga	A3	0
Melilla	A3	130
Murcia	B3	25
Orense/Ourense	D2	327
Oviedo	D1	214
Palencia	D1	722
Palma de Mallorca	B3	1
Pamplona/Iruña	D1	456
Pontevedra	C1	77
Salamanca	D2	770
San Sebastián/Donostia	D1	5
Santander	C1	1
Segovia	D2	1013
Sevilla	B4	9

TABLA 08. Zonas climáticas de la Península Ibérica Fuente: CTE-DB-HE-1. Figura editada por autor.

<sup>(22)</sup> - CTE-DB-HE: Ahorro de Energía, (2017), pág. 2, art. 15.1

### General

El objetivo general de este trabajo es avanzar en el conocimiento del comportamiento energético y ambiental de los espacios situados en edificios docentes construidos y ubicados en zonas con clima mediterráneo, con la finalidad de reducir la demanda, el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> en este tipo de edificios.

Además, también se valorarán sus condiciones ambientales y de calidad del aire interior para mejorar el confort térmico de sus usuarios. El trabajo se centrará, por tanto, en la rehabilitación energética y ambiental de espacios docentes mediante la utilización de técnicas pasivas de acondicionamiento ambiental, teniendo en mente, además, la repercusión que hoy en día tienen estas actuaciones en cuanto a la preparación de los edificios docentes hacia el cambio climático.

Para lograr alcanzar este objetivo, se utilizará el recinto más representativo en cuanto a la valoración del comportamiento energético de este tipo de edificios: el aula.

### Específicos

Además del objetivo general anteriormente descrito, este trabajo también contempla alcanzar otros objetivos más específicos:

- 1 - Valorar la demanda energética actual de un aula tipo de un edificio docente y evaluar diferentes opciones de reducción de la misma, con la utilización de técnicas pasivas de acondicionamiento ambiental, es decir, mediante una mejora de las envolventes térmicas y mediante técnicas de ventilación.
- 2 - Valorar el confort ambiental, tanto en condiciones de libre evolución como operativas (espacios ocupados en condiciones reales) de estos recintos.
- 3 - Comprobar la influencia de las medidas de pasivas de rehabilitación tomadas para mejorar la situación actual.
- 4 - En función de lo anterior, valorar la necesidad de utilización de sistemas activos para garantizar condiciones de confort térmico en el interior.

## Introducción

La metodología utilizada en este trabajo combina métodos experimentales, basados en la monitorización de condiciones ambientales, así como otros empíricos, mediante la utilización de métodos y herramientas de simulación, tanto ambientales como de demanda energética.

Ambos métodos se aplicarán a un caso de estudio concreto y real de espacio docente, lo suficientemente representativo para permita el contraste de las hipótesis y la validez de los resultados que se alcancen, buscando, una vez validados, proponer una serie de métodos y estrategias que mejoren la realidad actual del caso de estudio en cuanto a condiciones ambientales y demanda.

Dicha metodología se pretende desarrollar mediante las siguientes fases o tareas:

- 1 - Elección de un caso de estudio de un edificio docente.
- 2 - Monitorización de las condiciones ambientales del caso de estudio.
- 3 - Análisis de las condiciones actuales del caso de estudio.
- 4 - Elaboración de un modelo de simulación mediante la utilización de herramientas informáticas.
- 5 - Validación del modelo de simulación del caso de estudio.
- 6 - Propuestas pasivas de rehabilitación energética.
- 7 - Análisis de las condiciones de rehabilitación del caso de estudio.

Estas fases se explicarán más específicamente a continuación, y se desarrollarán sus contenidos en su totalidad y de manera más concreta en el siguiente apartado, que se refiere al análisis del caso de estudio.

## Elección de un caso de estudio

En este apartado se establecerán las bases de este trabajo, el caso de estudio. Se explicará el porqué de la elección de este caso de estudio así como el contexto del mismo, sus características y singularidades.

En primer lugar, se analizarán las características del espacio que alberga el caso de estudio que se ha elegido para la realización de este estudio energético, la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, así como las características del caso de estudio en concreto.

Se ha elegido para el caso de estudio el aula 4.08 de la ETSA, situada en la cuarta planta del edificio principal de esta facultad, ya que se considera un caso representativo para realizar una rehabilitación energética, a modo genérico, de edificios docentes superiores, por su localización climática, por la falta de aislamiento de sus cerramientos o por estar en contacto directo con la cubierta del edificio.



FIGURA 19. Boceto del exterior de la ETSA. Figura de elaboración propia.



FIGURA 20. Fotografías del aula del caso de estudio durante la realización de la medición. Fotos tomada por D. Ángel Luis León y editadas por el autor.

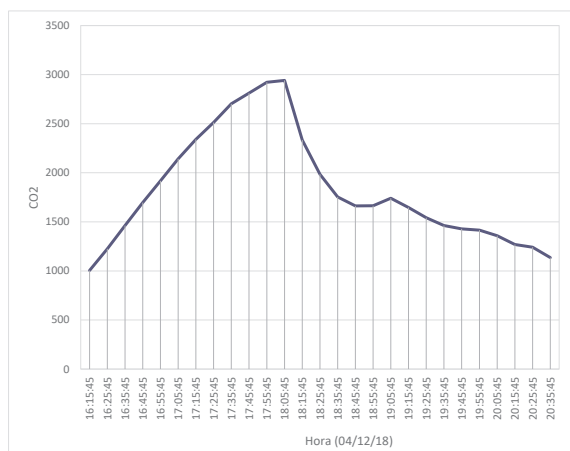




FIGURA 21. Imagen del aparato de medida Wöhler CDL 210. Fuente: [www.pce-iberica.es/hoja-datos/hoja-datos-cdl-210](http://www.pce-iberica.es/hoja-datos/hoja-datos-cdl-210)

Especificaciones técnicas del registrador de datos	
Rango de medición de CO <sub>2</sub>	0 ... 2000 ppm CO <sub>2</sub> (2.001 - 9.999 ppm fuera del rango especificado)
Precisión CO <sub>2</sub>	50 ppm ± 5 %
Resolución	1 ppm (0-100 ppm)
Principio de medición	Procedimiento NDIR (analizador no dispersivo por absorción en los infrarrojos)
Temperatura	-10 ... +60 °C
Precisión temperatura	±0,6 °C
Resolución	0,1 °C
Humedad del aire	5 ... 95 %
Precisión	de 10 ... 90 %, 25 °C ±3 % sino ±5 %
Resolución	0,1 %
Pantalla	Indicación simultánea de la concentración de CO <sub>2</sub> , la temperatura y la humedad relativa
Valoración de las condiciones climáticas	Good (óptimo) Normal (normal) Poor (crítico)
Memoria	5300 series de valores
Datos	hasta 16000
Cuota de medición	3 / 10 / 30 segundos 1 / 3 / 10 / 30 minutos 1 / 3 / 4 horas
Alimentación	Componente de red AC 5 V / 0,5 A
Conexión al PC	Puerto USB
Dimensiones	120 x 100 x 110 mm

FIGURA 22. Ficha técnica del aparato de medida Wöhler CDL 210. Fuente: [www.pce-iberica.es/hoja-datos/hoja-datos-cdl-210](http://www.pce-iberica.es/hoja-datos/hoja-datos-cdl-210)



GRÁFICA 01. Gráfica obtenida en la medición del CO<sub>2</sub> del aula el día 4 de diciembre de 2018 en el horario de tarde. Gráfica elaborada por autor.

Se estudiará y se profundizará sobre las características del edificio y de la realidad que supone su uso y su ubicación, como son: la historia del edificio, el tipo de cerramiento, sus materiales, la orientación del edificio, sus medidas espaciales, su geometría, su capacidad de uso, su régimen de ocupación, el clima del lugar, etc.

De esta forma, se podrán establecer las bases características del caso de estudio sobre el que se va a trabajar, que servirán para conocer la realidad actual del mismo y poder así crear un modelo informático fiable, en relación con las condiciones ambientales reales actuales, y utilizar el mismo para establecer estrategias de mejora que permitan alcanzar los objetivos de este trabajo, anteriormente descritos.

## Monitorización de las condiciones ambientales

A continuación, se procederá a realizar la monitorización de las condiciones ambientales del caso de estudio, el aula 4.08. Se medirán y tomarán datos de temperatura, humedad, CO<sub>2</sub> y punto de rocío en diferentes situaciones, como pueden ser, en libre evolución, con el aula ocupada, sin ocupar, a diferentes horas del día o en diferentes días.

La monitorización de las condiciones ambientales se ha realizado mediante un equipo de medida denominado Wöhler CDL 210, que permite medir estos parámetros ambientales en determinados puntos de un espacio. Se adjunta la ficha técnica completa del aparato de medida en la parte izquierda de esta página.

Estos datos que se obtendrán a partir de la monitorización del aula ayudarán a completar, junto con lo anterior, el conocimiento de la realidad actual del aula, llegando a conocer su funcionamiento térmico para así poder mejorarlo, como ya se ha comentado anteriormente, a partir del modelo que se va a generar.

## Análisis de las condiciones actuales del caso de estudio

Una vez obtenidos los datos ambientales del aula mediante la monitorización de la misma, se analizarán los valores que se han obtenido y se compararán con los diferentes datos que exigen o aconsejan las diversas normativas existentes acerca de la demanda energética, el confort térmico y la calidad del aire.

Para esto, se han generado gráficas con los datos proporcionados con la monitorización del aula, para así poder ver de manera más ilustrativa como se comporta el aula, en cuanto a los parámetros ambientales relativos a la temperatura interior del aula, la cantidad de CO<sub>2</sub>m, la humedad relativa y la temperatura de rocío. Además, de esta manera resultará más fácil poder comparar, posteriormente, los valores actuales de estos parámetros con los valores de los mismos en las gráficas que genera el modelo de simulación ambiental que se va a crear.

## Elaboración de un modelo de simulación

Después de asentar las bases características tanto materiales como ambientales del caso de estudio, se continuará el trabajo con la creación de un modelo de simulación, mediante la utilización del soporte informático Design Builder (v. 2.4.2.026), que permite recrear el espacio del caso de estudio de la manera más fielmente posible a la realidad.

Este programa es una herramienta de análisis energético y medio ambiental para edificios que utiliza el sistema de simulación EnergyPlus, uno de los motores de simulación más potentes y reconocidos del mundo que permite calcular demandas, consumos, temperaturas, confort; visualizar resultados desde 1 minuto hasta 1 año y que funciona a partir de la definición de la geometría, envolvente, instalaciones y uso de los edificios <sup>(23)</sup>.

Para elaborar el modelo de simulación se han utilizado los planos de la ETSA, tanto de la planta cuarta, donde se ubica el aula 4.08, como de la planta inmediatamente inferior. Los planos y la geometría del aula se han adquirido de los archivos en formato AutoCAD que proporciona la página de la propia Escuela de Arquitectura <sup>(24)</sup>.

Exportando los planos al programa Design Builder en archivos DXF, se procede a extruir las plantas dos plantas en bloques, para luego crear particiones interiores donde existan tabiques. Se crean así dos volúmenes en tres dimensiones de las plantas tercera y cuarta, que son las que influirán sobre el ambiente del aula del caso de estudio debido al intercambio de calor entre espacios, los cuales se unirán y se que se les asignarán los materiales de los cerramientos, cubierta y particiones, recreando así el espacio del aula 4.08 y sus zonas adyacentes.

A continuación, se procederá a establecer el resto de características que puedan influir a la hora de simular el comportamiento térmico de un aula cualquiera, como pueden ser: la distribución de los distintos huecos, su factor de marco, la ocupación del aula o la temperatura interior y exterior.

## Validación del modelo de simulación

Una vez creado el modelo de simulación, se procederá a validarlo, es decir, a compararlo con la realidad y, si es necesario, ajustarlo para que sea fiable y pueda considerarse válido para, posteriormente, trabajar sobre el mismo, buscando mejorar sus condiciones ambientales.

La validación se realizará mediante comparación. Se recreará una situación similar a real en la generación del modelo de simulación inicial, sobre el cual se hará la primera simulación de sus condiciones térmicas. Al realizar la simulación, el programa genera una serie de gráficas relativas a las condiciones ambientales que se producen en el modelo del aula, las cuales se compararán con las gráficas que se van a realizar a partir de los datos obtenidos en la monitorización del aula.

Por lo tanto, se procederá a comparar los datos del modelo creado y de los datos medidos en la monitorización, ajustando el modelo lo que sea necesario para que se obtengan datos que sean lo más parecidos posible a la realidad que se midió durante la monitorización del aula.



FIGURA 23. Logos de los softwares Design Builder (a) y EnergyPlus (b). Fuente: [www.ecoeficiente.es](http://www.ecoeficiente.es). Figura editada por autor.

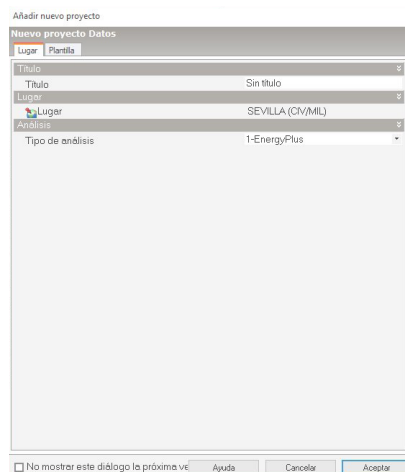


FIGURA 24. Pantalla principal para abrir un nuevo proyecto en el software Design Builder.

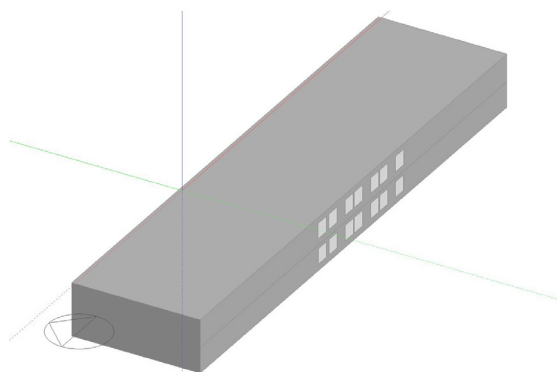


FIGURA 25. Figura del modelo de las plantas 3ª y 4ª creado en Desing Builder.

<sup>(23)</sup> - [www.ecoeficiente.es/DesignBuilder/](http://www.ecoeficiente.es/DesignBuilder/)

<sup>(24)</sup> - [www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA/](http://www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA/)

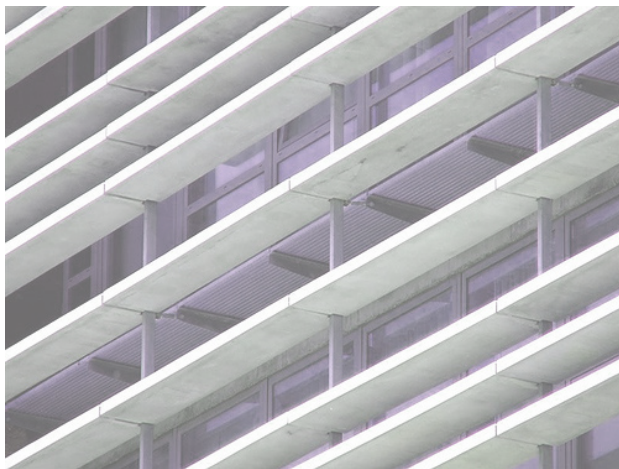


FIGURA 26. Protección solar de la fachada oeste de la ETSA. Fuente: [www.espacioelevadoalpublico.wordpress.com/2012/05/14/asamblea-de-estudiantes-etsa-sevilla-jueves-17-de-mayo-de-2012/](http://www.espacioelevadoalpublico.wordpress.com/2012/05/14/asamblea-de-estudiantes-etsa-sevilla-jueves-17-de-mayo-de-2012/). Figura editada por autor.

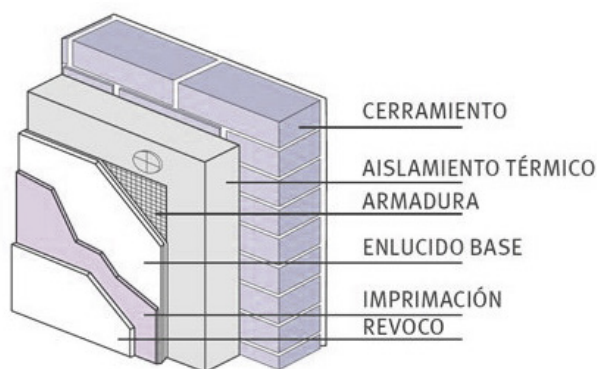


FIGURA 27. Ejemplo de rehabilitación energética de fachadas mediante el sistema SATE. Fuente: [seicorlan.com/fachadas-sate-donostia/](http://seicorlan.com/fachadas-sate-donostia/). Figura editada por autor.

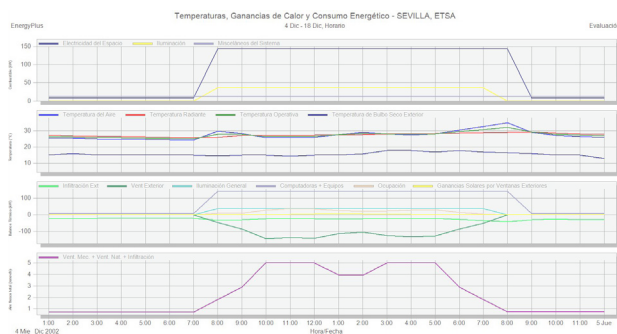


FIGURA 28. Ejemplo de las gráficas generadas al realizar la simulación del modelo por el programa Design Builder.

## Propuestas pasivas de rehabilitación energética

A continuación, una vez conocido todo lo relativo a las condiciones ambientales que presenta en la actualidad el caso de estudio, se procederá a establecer una serie de propuestas de mejora para el mismo.

Esto se realizará mediante técnicas pasivas de rehabilitación energética que buscarán mejorar las carencias actuales en los ámbitos de la demanda, confort térmico y calidad del aire que pueda tener el aula 4.08.

Las medidas pasivas que se van a estudiar para buscar la mejora de las condiciones del caso de estudio, en términos generales, son:

- Aplicación de aislamiento térmico en la fachada, ya que actualmente carece del mismo.
- Mejora del aislamiento de la cubierta.
- Mejora de los huecos existentes.
- Aplicación de elementos de protección solar.
- Reducción de las infiltraciones de aire.
- Mejorar la renovación del aire del interior del aula.

A partir de estas premisas que se van a intentar alcanzar, se realizarán diferentes simulaciones del modelo para ver como van evolucionando las condiciones ambientales del aula, a través de diferentes hipótesis, para acabar unificándolas todas hasta conseguir una condición de confort aceptable y con la menor incidencia posible en el estado actual, procurando la viabilidad económica y la menor complicación posible en la aplicación de estas medidas de mejora.

## Análisis de las condiciones de rehabilitación energética del caso de estudio

Finalmente, se volverá a realizar una simulación del modelo, una vez mejorado el mismo, para así poder analizar los datos que se obtienen al aplicar las medidas pasivas de mejora del ambiente térmico que se establecían en el apartado anterior. La simulación se realizará en diferentes meses y estaciones del año, para así tener unos resultados lo suficientemente representativos del funcionamiento diario del aula rehabilitada.

Con las gráficas generadas por el programa Design Builder realizando la simulación, se volverán a realizar una comparación con las diferentes normativas que regulan o establecen unos mínimos de calidad ambiental, para así corroborar si se produce o no esa mejoría, en cuanto a demanda energética, confort térmico y calidad del aire, del modelo generado y rehabilitado, respecto al estado actual del aula, así como la medida en la que se ha producido esta mejora. Además también se valorará si la realización de estas medidas pasivas de rehabilitación para mejorar las condiciones ambientales del aula son rentables o no, así como su facilidad de aplicación, etc.



## Introducción

Una vez establecidos el marco teórico sobre el tema que trata este trabajo, los objetivos y la metodología del mismo, se dispone a continuación el contenido práctico de este estudio, que irá enfocado a realizar un modelo genérico de un aula de la ETSA de Sevilla, como ya se ha mencionado anteriormente.

La US es una universidad pública con sede en Sevilla, concretamente en la Real Fábrica de Tabacos, que fue fundada en 1505 y que consta de más de ochenta mil usuarios, entre alumnos y profesorado, así como de múltiples campus distribuidos por varias zonas de la ciudad.<sup>(25)</sup> Uno de estos diversos campus está situado en la Avenida de Reina Mercedes, en la parte sur de la ciudad, y es donde se ubica la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA). Esta facultad perteneciente a la US, consta de dos edificios diferenciados, uno más reciente, conocido de manera coloquial como "aulario", y otro más antiguo, construido en 1960.

En este trabajo nos centraremos en el aula 4.08 de la ETSA, situada en la planta cuarta del edificio antiguo de esta facultad. Se tomarán datos relativos a la humedad, la temperatura, el CO<sub>2</sub> y el punto de rocío, en diferentes horas y fechas, y con el aula ocupada y sin ocupar, así como medidas espaciales del aula en concreto y de los espacios adyacentes. Una vez obtenidos y analizados todos los datos, se procederá a la realización del modelo genérico mediante el programa Design Builder, que permitirá hacer simulaciones con diferentes premisas para así poder establecer condiciones de confort térmico en el interior del aula 4.08.

La ciudad de Sevilla se encuentra ubicada, como se ha comentado anteriormente, en la zona climática B4, según la clasificación que establece el Código Técnico de la Edificación (CTE)<sup>(26)</sup>. Se trata de un clima mediterráneo, con alta influencia marítima por su baja altitud respecto al nivel del mar (11 msnm), de características templadas - cálidas con una temperatura media anual de 19,2 °C. Los inviernos son suaves, con temperaturas mínimas de 5 °C de media, y los veranos cálidos y secos, y de mucha prolongación en el tiempo, llegándose a alcanzar temperaturas de hasta 47,2 °C. La humedad relativa media varía entre un 34-40 %.<sup>(27)</sup>

Las características del clima donde se ubica el caso de estudio unidas a la creciente manifestación de las consecuencias del cambio climático hace que este estudio tome peso e importancia, ya que resulta cada vez más necesario adecuar los edificios ante los aumentos descontrolados de las temperaturas que, en el caso de Sevilla, llevarán a que se establezcan unas condiciones térmicas exteriores alarmantes y peligrosas.

## Caracterización del caso de estudio

### Geometría y características espaciales

El aula 4.08 se sitúa en la planta cuarta del edificio principal de la ETSA. El aula tiene un área de 68,47 m<sup>2</sup> y se sitúa en la parte central del volumen que forma el edificio, orientada hacia el sur, y estando delimitada por el pasillo de acceso a las aulas, por el norte, por el aula 4.07, por el oeste, y por un despacho, por el este.

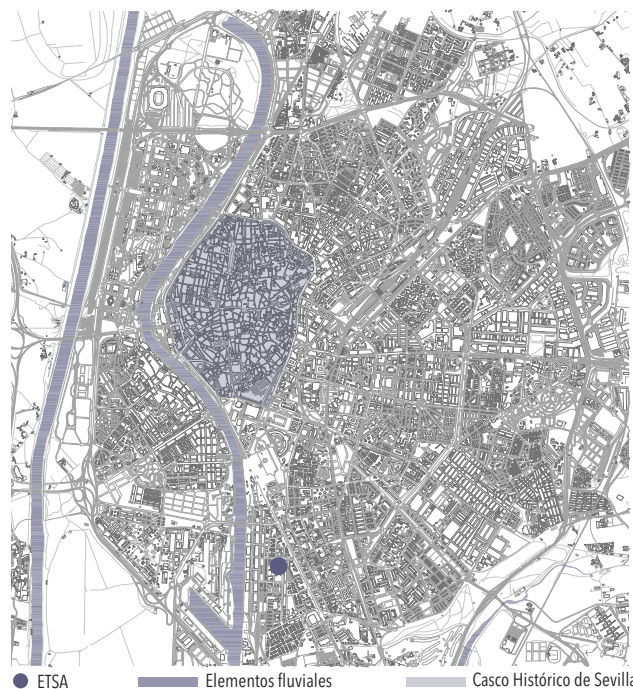


FIGURA 29. Ubicación de la ETSA con respecto a Sevilla. Figura de elaboración propia.

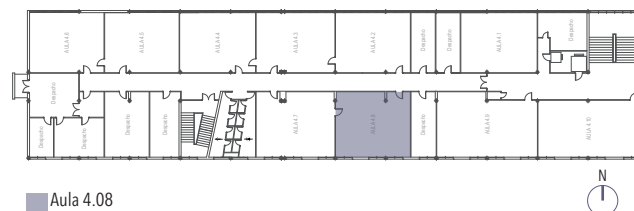


FIGURA 30. Plano de la planta cuarta de la ETSA - US. Fuente: [www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA](http://www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA). Figura editada por autor.

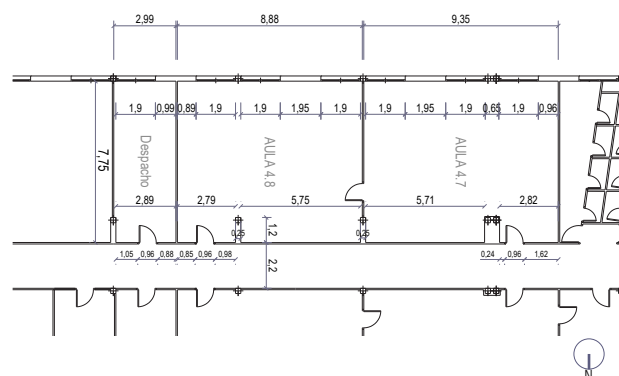


FIGURA 31. Detalle del replanteo del aula 4.08 y sus espacios adyacentes. Fuente: [www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA](http://www.etsa.us.es/descargas/general/planos/ETSA). Figura editada por autor.

<sup>(25)</sup> - Wikipedia, (12/11/2018), párrafos 1 y 2.

<sup>(26)</sup> - CTE-DB-HE, (2017). Ahorro de energía

<sup>(27)</sup> - [www.eltiempo Sevilla.es/el-clima-de-sevilla/](http://www.eltiempo Sevilla.es/el-clima-de-sevilla/)

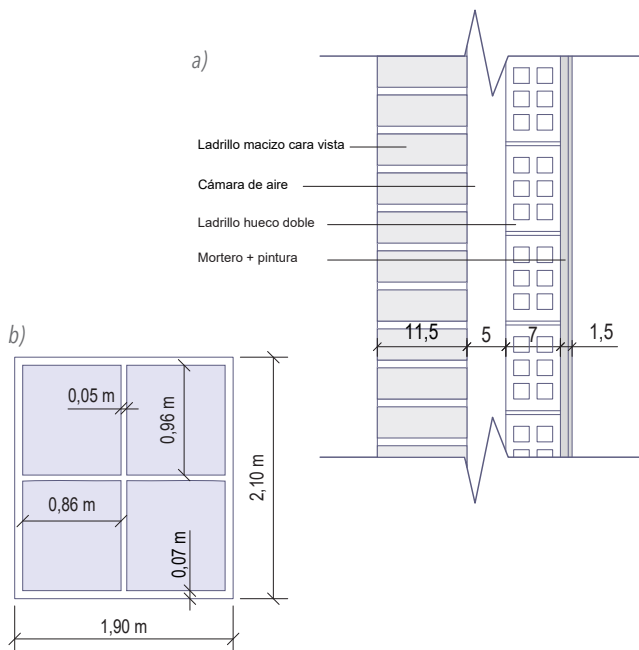


FIGURA 32. Detalle del cerramiento de fachada genérico de la ETSA (a) y de una ventana tipo (b). Figura de elaboración propia.

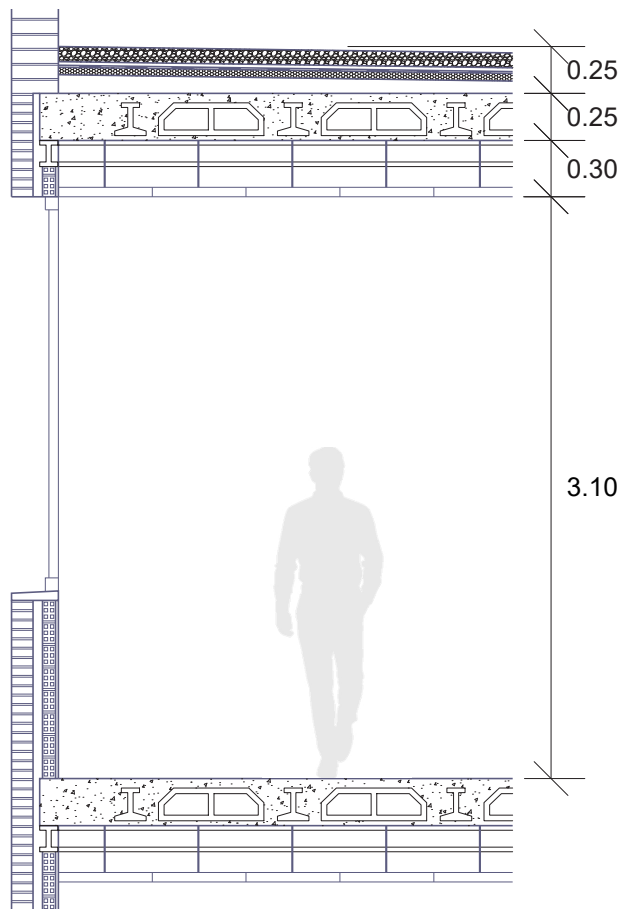


FIGURA 33. Sección de fachada tipo de la ETSA. Figura de elaboración propia.

En el nivel inferior (planta tercera) la distribución es parecida, por lo que el forjado inferior del aula en cuestión es colindante a parte de un aula y a parte de un despacho. La planta cuarta es el nivel más alto del edificio, por lo que por encima del forjado superior del aula 4.08 se sitúa la cubierta del edificio.

Para el desarrollo del modelo de simulación, necesitamos saber las medidas espaciales del aula, por lo que, cotejando los planos existentes de la ETSA, que proporciona la propia web de la escuela, y realizando el levantamiento in situ del aula mediante mediciones, se han obtenido las medidas necesarias para poder realizar el modelo y poder dibujarlo en el programa Design Builder.

Además, también se han tomado los datos de las medidas de los espacios adyacentes, ya que serán necesarios para poder llegar a un mayor nivel de precisión en cuanto al comportamiento térmico del aula que ocupa a este caso de estudio. En la figura 26 de la página anterior, se pueden ver todas estas medidas en planta, tanto del aula 4.08 como de los espacios adyacentes a la misma.

### Características constructivas

El cerramiento de fachada que envuelve a todo el edificio está compuesto por una capa exterior de medio pie de ladrillo macizo cara vista, una cámara de aire, un tabique de ladrillo hueco doble, mortero y pintura, siendo su grosor total 25 centímetros. Las otras tres caras del aula están compuestas por tabiques de pladur de 7 centímetros. Los espacios adyacentes tienen características similares a las descritas anteriormente.

Durante el levantamiento del aula, se observó también el tipo de forjado así como la existencia de falso techo. El forjado está formado por viguetas pretensadas y bobedillas cerámicas, apoyadas en vigas metálicas de 14 centímetros de canto. El canto de forjado, que se pudo estudiar en el hueco de escaleras, es de 25 centímetros, por lo que el forjado tiene un canto total de 38 centímetros, contando con las vigas, sin tener en cuenta la cubierta, que se estima de unos 25 centímetros aproximadamente entre formación de pendiente, lámina, aislamiento, mortero y grava.

La medida del falso techo se comprobó mediante la extracción de una placa registrable, siendo 30 cm su altura. Por lo tanto, sabiendo que el aula tiene una altura libre de 3,10 metros, la altura desde el suelo del aula hasta el suelo de la cubierta es de unos 3,80 metros.

En cuanto a los huecos, existen tres ventanas en el aula, una puerta que la comunica con el aula contigua y, obviamente, la puerta de acceso al pasillo. Las ventanas tienen una medida estándar de 1,90 metros de ancho y 2,10 metros de alto, estando situadas a 1 metro de altura del suelo del aula. Las ventanas están formadas por un vidrio de una sola hoja de 6mm de espesor y están divididas en cuatro paños por un marco exterior de 7 centímetros y un marco interior de 5 centímetros. Se ha calculado su factor de marco obteniendo un valor del 68%.

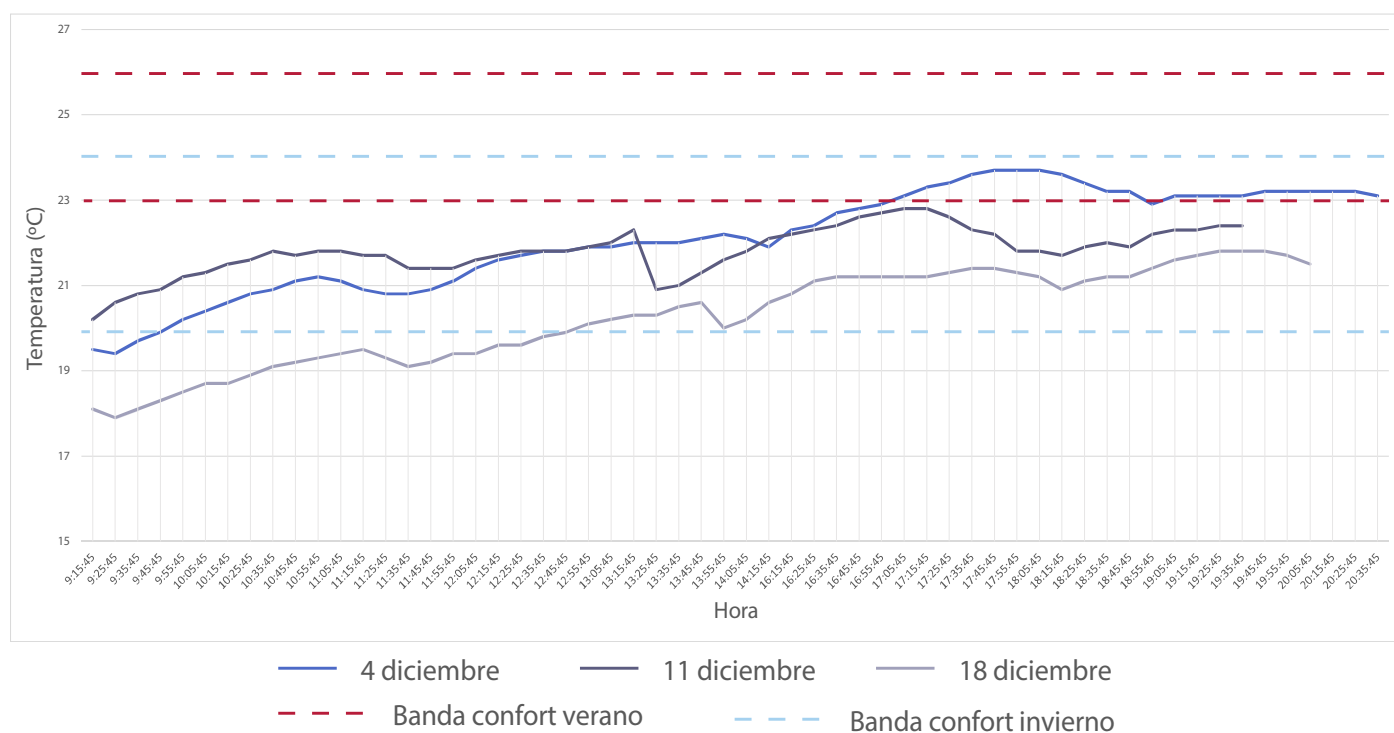
### Ocupación del aula

Una vez analizada el aula en cuanto a sus medidas, sus tipos de cerramientos y demás características arquitectónicas, se ha estudiado su ocupación. El aula tiene una variación de ocupación dependiendo del día, la hora e incluso del año. Según los alumnos que se matriculen en el curso y se le asigne el aula 4.08, la ocupación varía, además, por las mañanas que por las tardes, ya que en general hay más alumnos en el horario matinal. La ocupación máxima de un aula tipo en este centro suele ser de entre unos 25 o 30 alumnos, más el profesor o profesores. En el caso que nos ocupa, la ocupación en los días en los que se han realizado las medidas de los factores ambientales varía entre 10 y 22 alumnos, estando el aula desocupada en los descansos y al terminar las clases y siendo diferente la ocupación antes y después de los descansos y en el horario de tarde y de mañana, siendo menor el número de alumnos en el horario matinal. Por lo tanto, con los datos obtenidos, se puede establecer una media de 11,3 alumnos por la mañana y 20,6 por la tarde, lo que da un total de ocupación de 15,95 alumnos de media, que en densidad sería 0,23 alumnos por metro cuadrado. Esto servirá para establecer los parámetros del modelo en relación con este aspecto, para así poder utilizar este factor a favor a la hora de establecer las pautas para lograr un mejor acondicionamiento térmico del aula.

Una vez conocidos todos estos datos, solo falta saber como se comporta térmicamente el aula en la actualidad, para poder realizar el modelo básico sobre el cual se trabajará para conseguir el modelo genérico que anteriormente se ha mencionado. Para ello, se han realizado mediciones ambientales del aula, que utilizaremos de base para poder verificar el buen funcionamiento del modelo básico creado en el programa Design Builder, como se verá más detalladamente en apartados posteriores.

### Monitorización de las condiciones ambientales

Para conocer las condiciones ambientales que presenta en la actualidad el aula del caso de estudio, se ha realizado una toma de datos relativos a la humedad, la temperatura, el  $\text{CO}_2$  y el punto de rocío en el interior del aula 4.08. La medición de estos datos se ha realizado mediante un aparato denominado Wöhler CDL 210, que permite medir estos parámetros en determinados puntos de un espacio. La medición se ha realizado de una manera semi-continua, empezando la medición a las 9:15 horas aproximadamente, con un parada entre las 14:15 horas y las 16:15 horas, aproximadamente, y cortando la medición a las 20:30 horas. Los datos se han tomado de esta manera y en tres días diferentes (04/12/2018, 11/12/2018 y 18/12/2018), realizando la medición cada 10 minutos. Se incluyen gráficas de la medición en estas páginas y los datos completos de las mediciones (tablas con datos) se incluyen en el anejo. El resultado de las mediciones proporcionan unos datos que servirán para cotejar y validar el modelo que posteriormente se ha creado, variando los parámetros que en éste influyen para que, en condiciones similares a las de las medidas, se obtengan los mismos datos, aceptando un margen de error mínimo.



GRÁFICA 02. Gráfica obtenida a partir de los datos de la medición de las temperaturas del aula los días 4, 11 y 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

## Análisis de las condiciones actuales

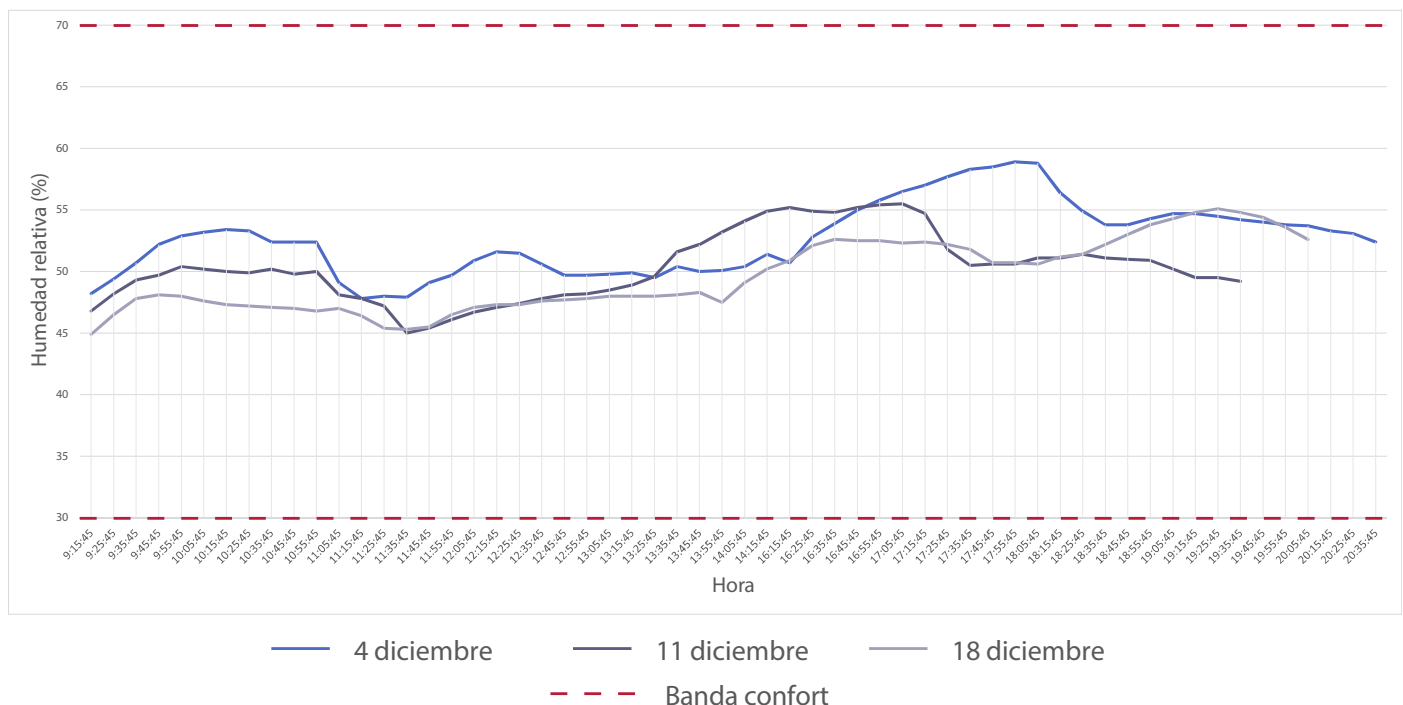
Tras la monitorización del aula y la obtención de los datos de sus características ambientales, se ha procedido a analizar los mismos, para así saber como funciona el aula térmicamente, si existen condiciones de confort o no, o si o cumplen o no las normativas vigentes relativas a las características ambientales.

Se han elaborado gráficas con los datos obtenidos, obteniendo una gráfica por cada uno de los tres parámetros medidos (humedad, temperatura y  $\text{CO}_2$ ) por día y por franja horaria (mañana y tarde). Es decir, se han obtenido un total de 24 gráficas que indican como varían los parámetros medidos en las dos diferentes franjas horarias medidos y por cada uno de los días. En las mediciones del aula, también se obtuvieron datos del punto de rocío, pero se han descartado para el análisis de las condiciones ambientales, ya que es un parámetro que depende de la temperatura y de la humedad relativa y no existe norma o recomendación alguna que la regule, por lo que, analizando y mejorando estos dos parámetros de los cuales depende, automáticamente éste mejorará.

Observando los resultados obtenidos\* y sabiendo que, según las Normas UNE <sup>(28)</sup>, la temperatura interior debe oscilar entre los 23 y 26 grados, en verano, y los 20 y 24 grados, en invierno, y la humedad relativa entre el 30 y el 70 por ciento, tanto en verano como en invierno, podemos concluir que la calidad ambiental y de confort térmico del aula en la actualidad no cumple siempre con estas indicaciones, ya que tanto la temperatura (ver gráfica 02) como la humedad relativa (ver gráfica 03) son, en varias ocasiones, dependiendo del día, mayores o menores que los valores entre los que debería oscilar para las fechas en las que se realizó la medición (invierno).

En cuanto al nivel interior de  $\text{CO}_2$ , se recomienda no superar una concentración superior a los 1.000 ppm, aunque a partir de los 800 ppm ya se puede considerar que el ambiente no es confortable. Como se puede observar en la gráfica (ver gráfica XX en el anejo), estos valores se superan casi constantemente en el aula 4.08, llegando a veces a alcanzar concentraciones cercanas a los 3.000 ppm, valores que se consideran ligeramente nocivos para la salud <sup>(29)</sup>.

Por lo tanto, se puede concluir que de los parámetros que se han tomado en la medición de las condiciones ambientales del aula 4.08, y que influyen en el confort térmico de los usuarios de la misma, cumplen bastante con las recomendaciones que se establecen, en cuanto a valores límite, para los mismos, a excepción de la temperatura, que determinados momentos está por debajo del mínimo, y del  $\text{CO}_2$ , que sobrepasa este límite casi constantemente.



GRÁFICA 03. Gráfica obtenida a partir de los datos de la medición de las humedades relativas del aula los días 4, 11 y 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

\* - Para ver todos los datos medidos y obtenidos, consultar el anejo. La gráfica de  $\text{CO}_2$  no se incluye en esta página ya que sus resultados no van a ser significativos para este trabajo.

<sup>(28)</sup> - UNE-EN ISO 7730, (2006).

<sup>(29)</sup> - Melo, Torres, Hernández, Pantoja, (2016).

## Creación de un modelo de simulación

### Creación del modelo geométrico 3D

Como ya se ha mencionado anteriormente, una vez conocidos todos los parámetros que influyen en el comportamiento térmico del aula, se procede a la generación de un modelo de simulación, mediante la utilización del soporte informático Design Builder (v. 2.4.2.026), que permitirá recrear y simular la situación actual, en términos térmicos, del aula. Con esto, se podrá generar un modelo con el que se trabajará para conseguir una recreación fiel de la realidad, para así poder posteriormente mejorarla.

El proceso de realización del modelo comenzará asignando al espacio de trabajo de Design Builder, al abrir un nuevo proyecto, los datos climáticos de la ciudad de Sevilla, que se encuentran cargados por defecto en el programa, para después exportar los archivos DXF de las plantas tercera y cuarta de la ETSA al programa. En la parte superior izquierda del espacio de dibujo existe una opción para asignar más datos por defecto al modelo, en el cual se ha elegido la plantilla de "Classroom", sobre la que luego se variarán los valores por defecto por los valores reales obtenidos en la medición.

Una vez asignados los diferentes valores por defecto y dispuesto los dibujos de las dos plantas, se realiza la opción de "dibujar bloque", que permite extruir una superficie asignando una altura y grosor de muros determinados. Se ha dibujado con la opción bloque de edificio, que es el tipo de bloque que permite al programa analizar sus condiciones interiores. Se crean, por tanto, dos volúmenes correspondientes a las plantas tercera y cuarta de la ETSA, a los que se les asigna una altura de suelo a suelo de 3,80 m y un grosor de muros de cerramiento de 0,25 m. Se ha dibujado la totalidad de la planta, para, posteriormente, dibujar las particiones, generando así los diferentes espacios interiores de las plantas. De este modo, se va generando a la izquierda de la pantalla principal del programa, un cuadro de diálogo que ramifica los diferentes espacios del modelo mediante una estructura de árbol que los separa por jerarquía descendente. Es decir, primero, tenemos el lugar, Sevilla, luego el edificio, la ETSA, a continuación, las plantas tercera, por un lado, y la cuarta, por otro, los diferentes espacios (aulas, despachos, pasillo...) de cada una de las plantas, y, finalmente, los cerramientos y particiones de los espacios interiores. Este sistema de ramificación que tiene el programa, en el que cada espacio perteneciente a otro depende del mismo, servirá de ayuda a la hora de establecer los datos que se han medido, ya que si se cambian en la raíz "madre" se cambiarán automáticamente en todo el modelo. Por lo tanto, se han mantenido los valores por defecto hasta tener el modelo geométrico completado.

Una vez dibujados los dos volúmenes y sus particiones, se sobrepone la planta 4ª a la 3ª, para que así tengan influencia los espacios adyacentes al aula 4.08 a la hora de realizar la simulación. Se dispone ahora de un único volumen en el que, por defecto, el programa establece una serie de ventanas distribuidas por toda la fachada según un valor de porcentaje de huecos que se asigna por defecto. Esta opción se ha desactivado para poder disponer las ventanas en el lugar que realmente se ubican. Se procede a continuación a dibujar las ventanas de la fachada sur. Se ha optado por dibujar únicamente las ventanas del aula del caso de estudio y de los espacios anexos a ésta, ya que en el intercambio de calor que influirá en las condiciones ambientales del aula, solo tendrán repercusión estos espacios.

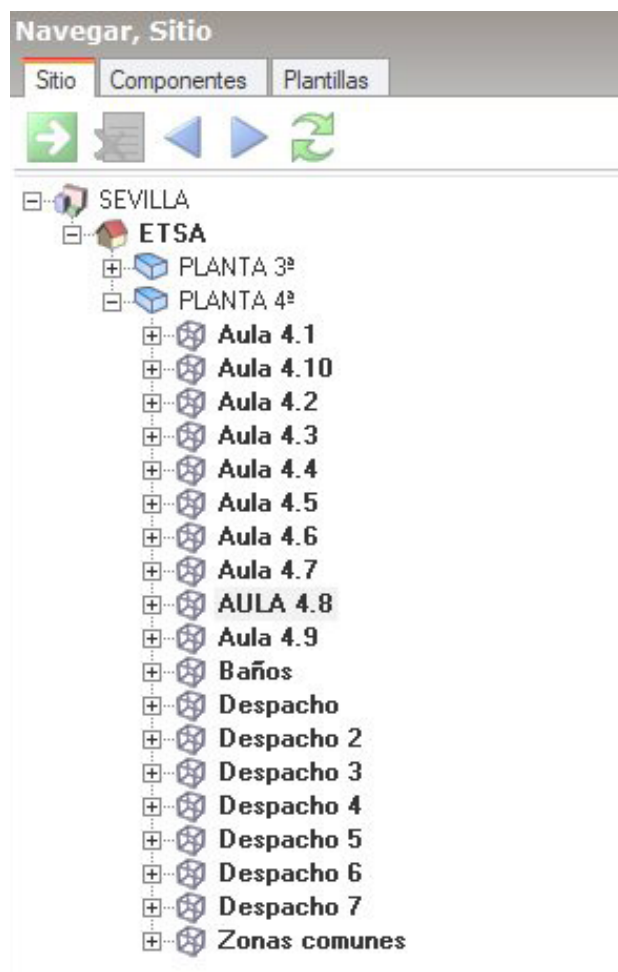


FIGURA 34. Cuadro de diálogo del programa DB que establece la estructura de árbol del programa.

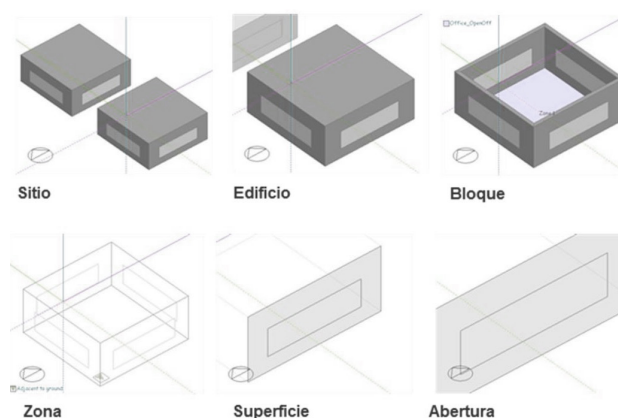


FIGURA 35. Ejemplo de los diferentes niveles de un proyecto tipo. Fuente: Manual de ayuda Design Builder en Español. Figura editada por el autor.



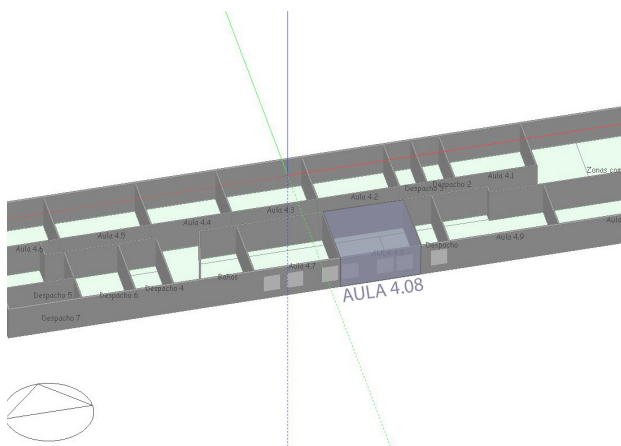


FIGURA 36. Bloque de la planta cuarta de la ETSA dibujada en la pantalla principal del programa Design Builder, donde se visualiza el modelo en 3D.

Datos del Modelo	
HVAC	CFD
Opciones	
Actividad	Cerramientos
Aberturas	Iluminación
Plantilla de Actividad	
Plantilla	Classroom
Sector	C2 Residential Instituto
Tipo de zona	1-Estándar
Multiplicador de zona	1
<input checked="" type="checkbox"/> Incluir zona	
<input type="checkbox"/> Include zone in daylighting calculations	
Ocupación	
Densidad (personas/m2)	0,2300
Programación	ETSA OCUPACIÓN
Metabolismo	
Actividad	Copia de Standing/
Factor (Hombre=1.0...)	1.00
Vestimenta	
Vestimenta en invi...	1.00
Vestimenta en ver...	0.50
ACS	
Control ambiental	
Computadoras	
<input checked="" type="checkbox"/> Activar	
Ganancia (W/m2)	58,00
Programación	ETSA
Fracción radiante	0.200
Equipos de oficina	
<input type="checkbox"/> Activar	
Misceláneos	
<input type="checkbox"/> Activar	
Cocina	
<input type="checkbox"/> Activar	
Procesos	
<input type="checkbox"/> Activar	

FIGURA 37. Pestaña de plantillas del modelo, donde se establecen las diferentes características del mismo.

Esto se ha realizado entrando en el espacio de cada uno de los espacios en el que se puede acceder a los muros y tabiques de éstos, apareciendo una opción en la parte superior de la pantalla que permite dibujar ventanas con la geometría, las dimensiones y la disposición que se prefiera. Las ventanas adquieren unos parámetros de grosor de vidrio o factor de marco que se cambiarán a continuación según los valores medidos. Una vez dispuesto el modelo geométrico, se procede a cambiar los valores por defecto que del programa por los reales, correspondientes a la ocupación, las características de los cerramientos, cubierta, particiones y huecos.

### Asignación de valores reales

Para empezar, de las plantillas que incluye el programa donde se establecen los valores por defecto, entre las que se encuentran la de actividad, la de cerramientos, la de aperturas, la de iluminación y la de HVAC, desactivamos todas las opciones que aparecen en ésta última, exceptuando la de ventilación, para que la simulación se produzca en condiciones de libre evolución. A continuación, en la plantilla de Actividad, se introducen los valores reales, relativos a la densidad de ocupación, a la tasa metabólica, a las cargas de los ordenadores y a la vestimenta. Los datos asignados son los siguientes:

- Densidad de ocupación: 0,23 personas/m<sup>2</sup>
- Tasa metabólica: 1 met<sup>(30)</sup>
- Cargas de ordenadores: 58 W/m<sup>2</sup>
- Vestimenta: 1 clo en invierno y 0,5 clo en verano (por defecto)

Estos valores se obtienen fácilmente conociendo la ocupación del aula (15,95 personas de media, según se ha calculado anteriormente), el área de la misma (68,47 m<sup>2</sup>) y la carga que producen los ordenadores (se hace una estima de 250 W por ordenador y de que existe un ordenador por persona).

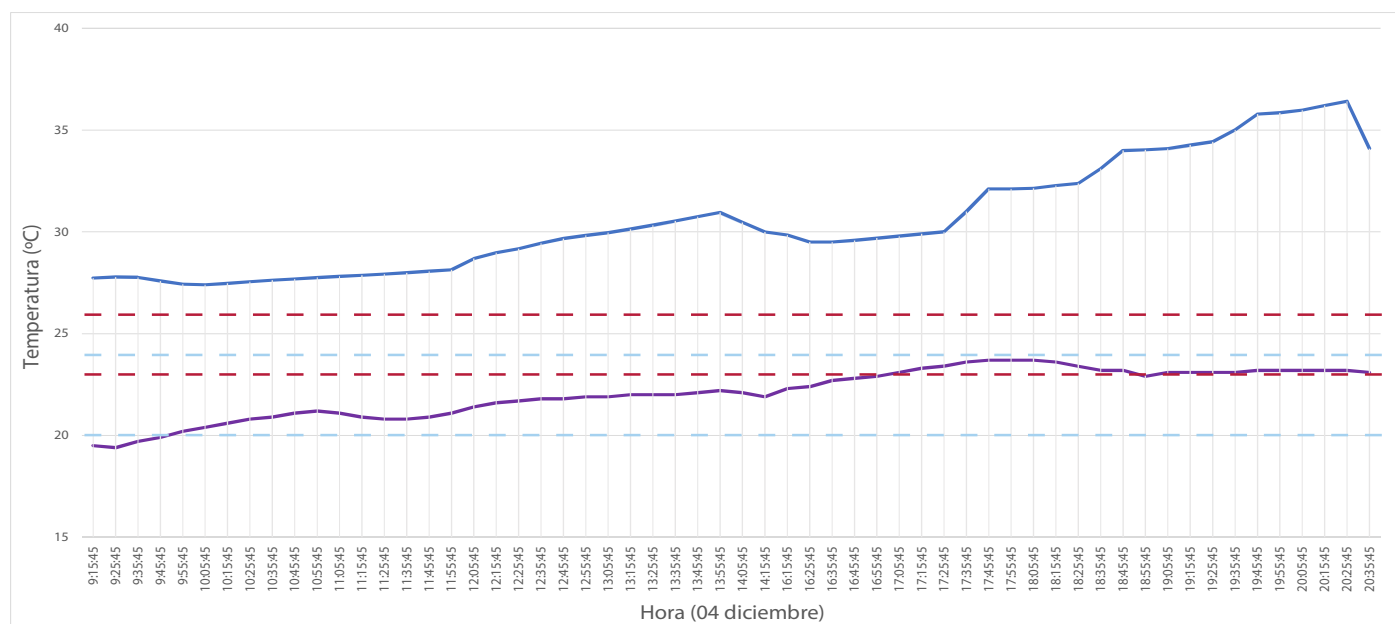
Por otro lado, también habrá que variar los datos por defecto que se le asignan a los distintos cerramientos, particiones y huecos. Se modifican los datos que aparecen por los reales para que así la simulación resulte efectiva y sea lo más válida posible. En cuanto a los huecos, se les ha asignado un vidrio simple de 6 mm y se han establecido las dos particiones que dividen las ventanas en cuatro, con un marco exterior de 7 cm y un marco interior de 5 cm. Con el resto de elementos que forman la envolvente del aula, como son cerramientos, particiones, cubierta y suelo, se ha procedido de igual manera que con los parámetros anteriores, según lo establecido anteriormente, donde se establecían las medidas y materiales reales de estos elementos.

### Realización de la primera simulación

Una vez establecidos todos los datos reales que definen como es geométricamente el aula y sus características de ocupación, de cerramientos, etcétera, se procede a realizar la primera simulación del modelo, a través de la cual el programa calculará multitud de datos ambientales del modelo, en general, y del aula 4.08, en particular.

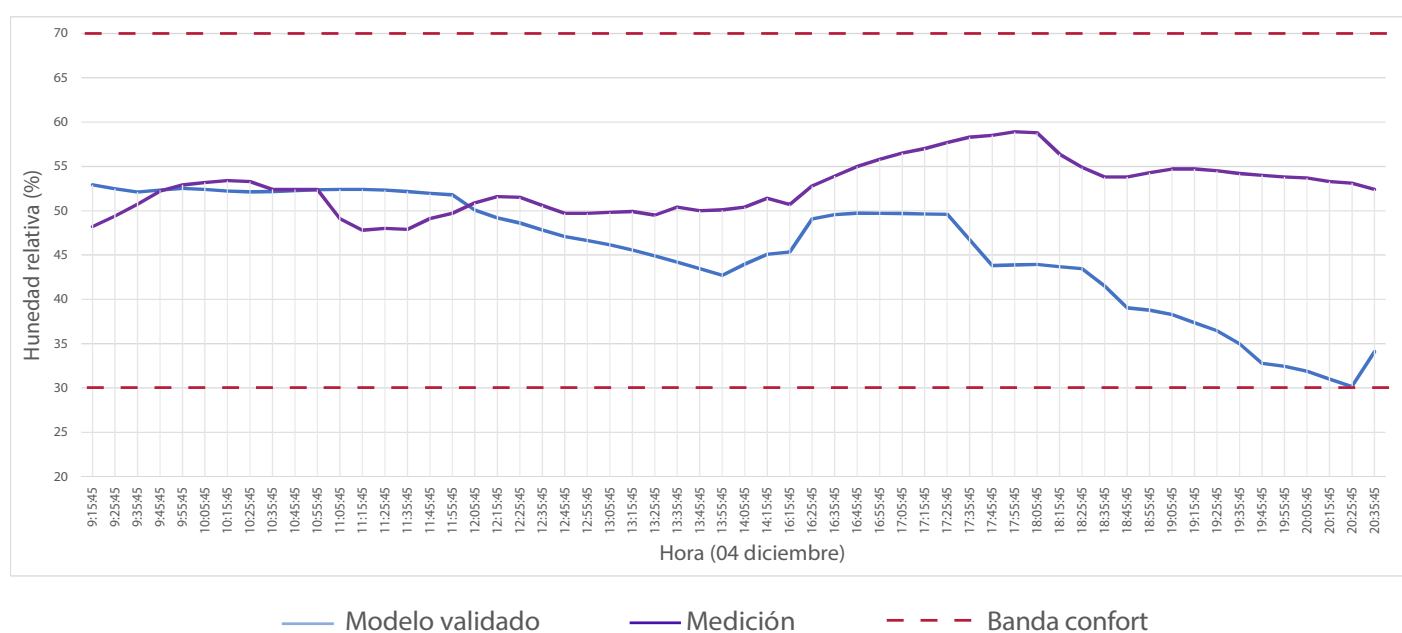
<sup>(30)</sup> - UNE-EN ISO 7730, (2006).

Para ello, solo será necesario seleccionar la pestaña de "simulación" que aparece en la parte central superior de la pantalla, apareciendo un cuadro de diálogo en el que se establecerán las características que se pretenden analizar en la simulación, en que formato se quiere visualizar o el rango temporal que se quiere analizar. Una vez realizada la simulación, se analizan los datos obtenidos, observando cierta similitud con los de la medición real del aula en cuanto a humedad relativa, pero, sin embargo, los niveles de temperatura son muy diferentes, siendo prácticamente 10°C superior a todas horas (ver gráficas 04 a 09). Por lo tanto, será necesario ajustar el modelo hasta conseguir valores con un margen de error mínimo entre la medición real y los resultados de la simulación, lo cual se realizará mediante la consideración de diferentes parámetros que no se tuvieron en cuenta en la elaboración del modelo inicial, suponiendo que sus consecuencias podrán acercar los nuevos resultados a la realidad que se midió.



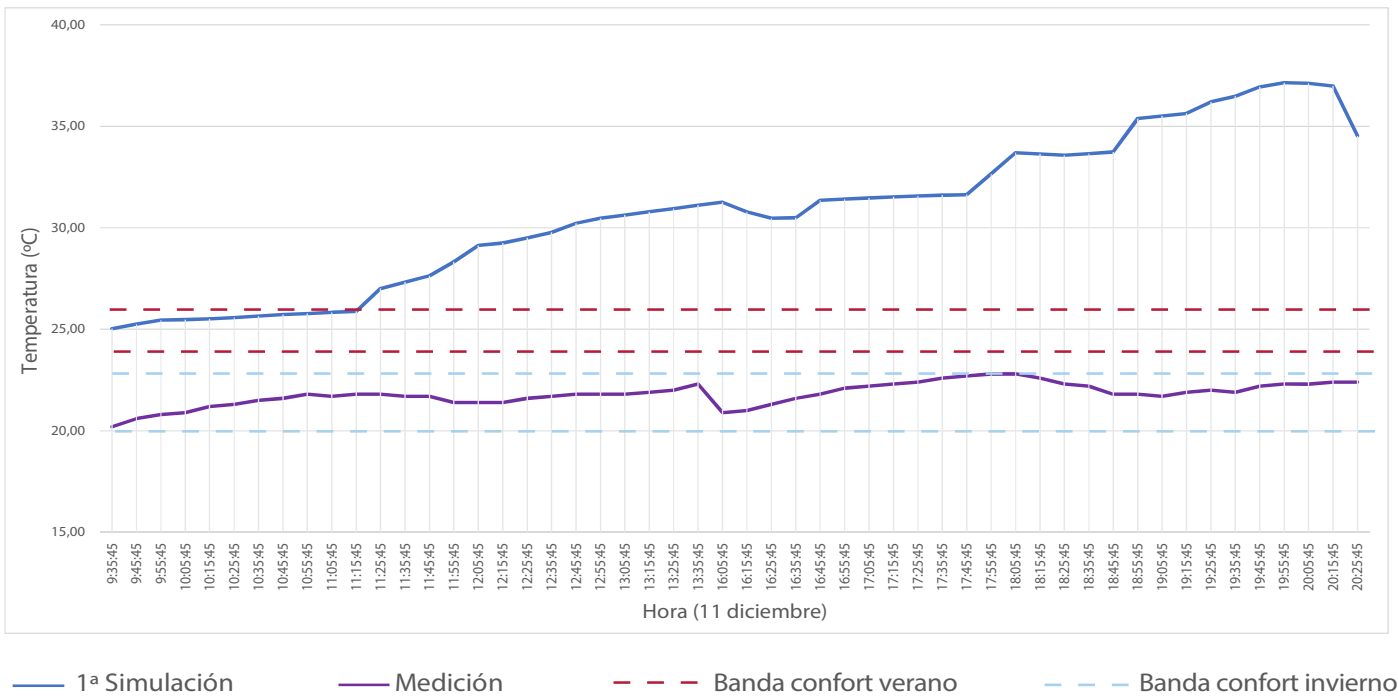
1ª Simulación Medición Banda confort verano Banda confort invierno

GRÁFICA 04. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

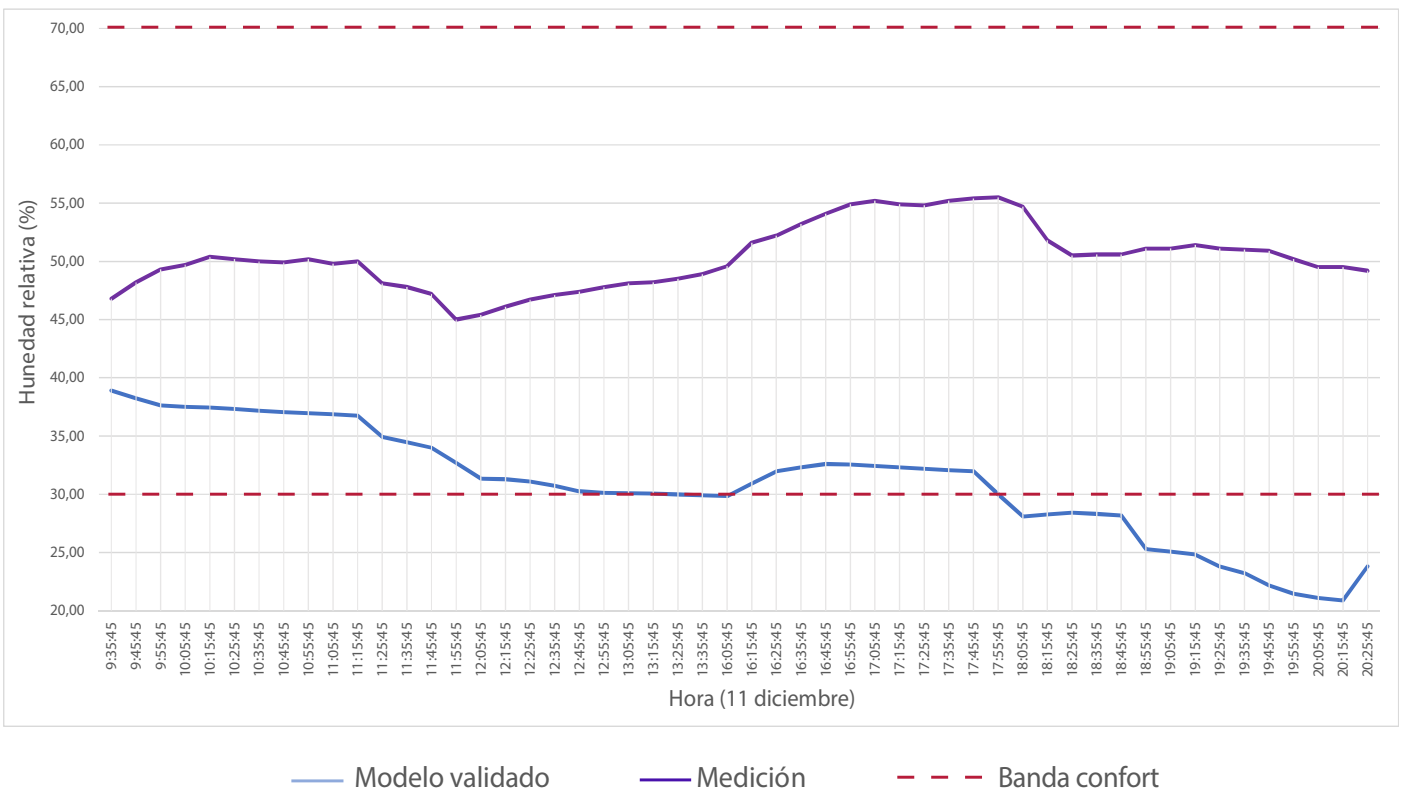


Modelo validado Medición Banda confort

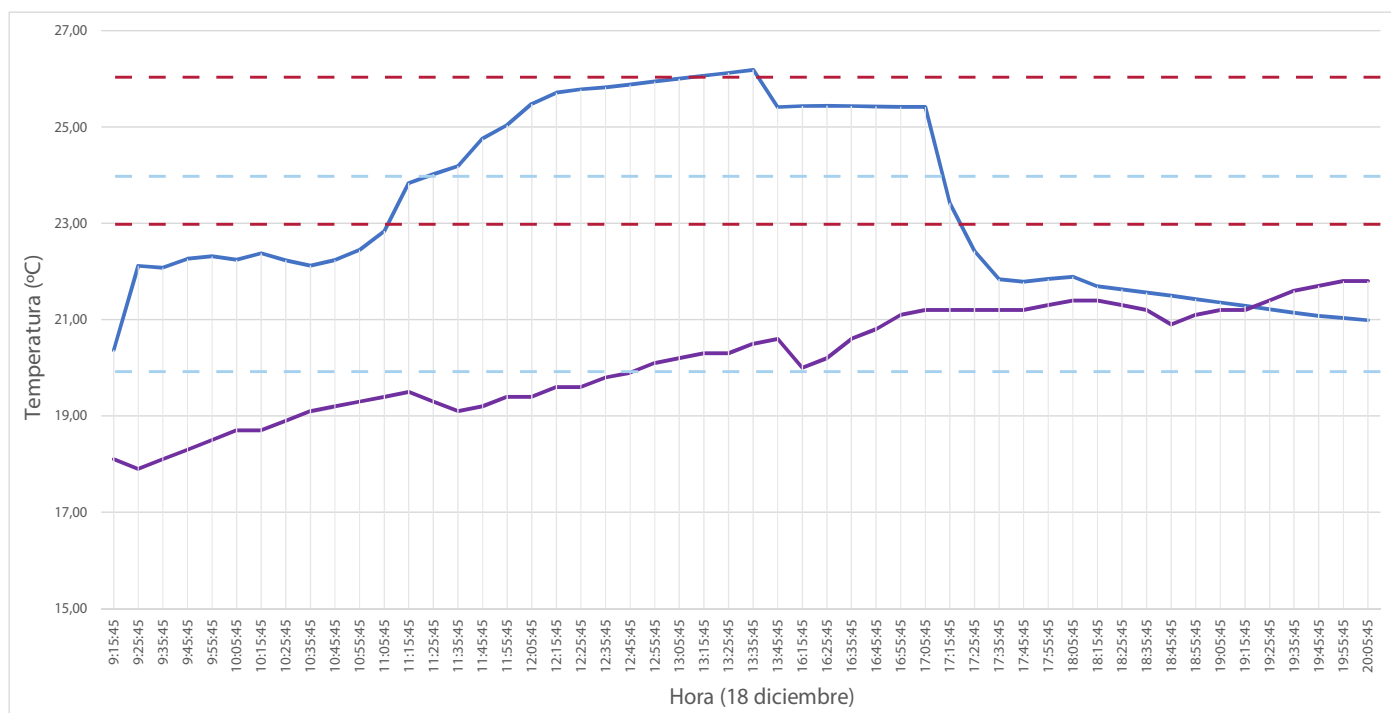
GRÁFICA 05. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 06. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

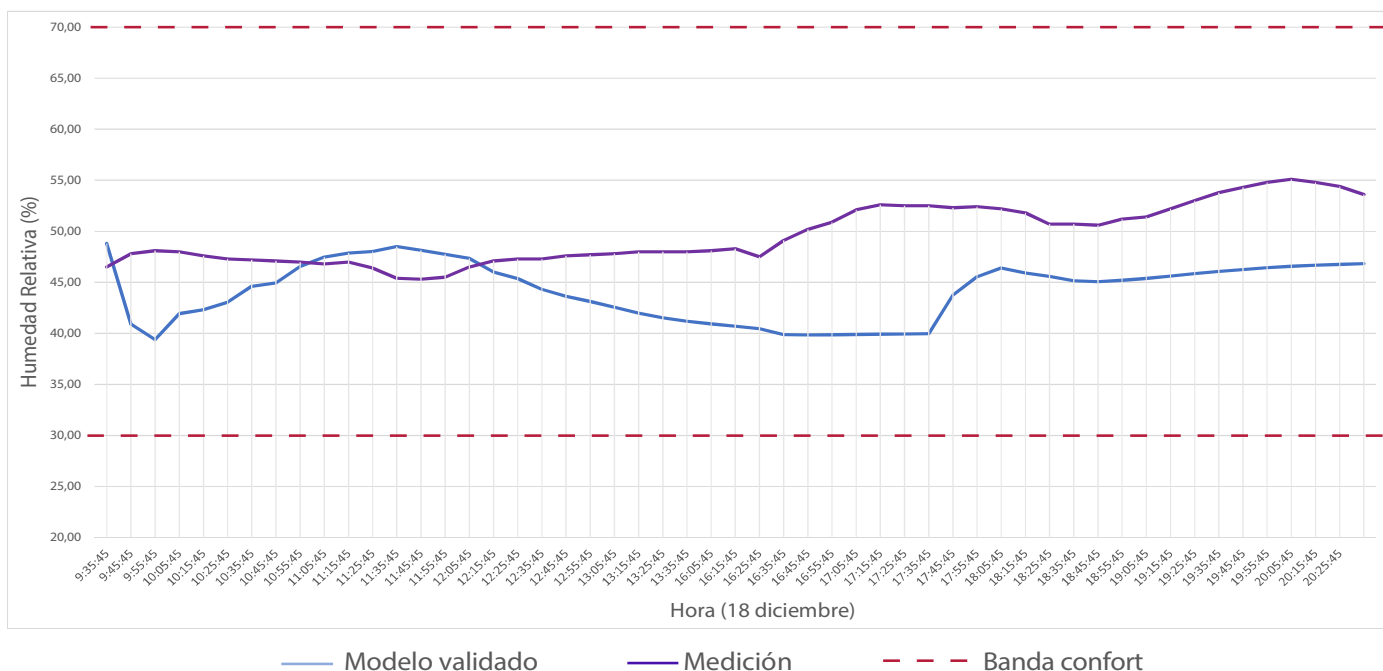


GRÁFICA 07. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



— 1ª Simulación — Medición - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 08. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



— Modelo validado — Medición - - - Banda confort

GRÁFICA 09. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

## Validación del modelo

Para acercar los datos que se obtienen mediante la simulación del modelo a los de la medición del aula, se ha procedido a analizar los posibles fallos en la elaboración del modelo inicial y a completar campos que no se han tenido en cuenta por considerarse poco influyentes, teniendo en realidad bastante influencia en los resultados de parámetros ambientales.

Para empezar, se observaron algunos errores en la asignación de los valores de ocupación y de carga de equipos debido al funcionamiento que tiene el programa en forma de ramificación en estructura de árbol, por la que, si se le asigna un valor a un espacio, todos los que dependen del mismo lo adquieren. Las modificaciones de estos valores, que inicialmente estaban por defecto, se realizaron al nivel de todo el edificio, del cual dependen todos los espacios de las plantas tercera y cuarta.

Por lo tanto, los pasillos, los despachos y el resto de aulas tienen los mismos valores de ocupación y de cargas por equipos que tiene el aula 4.08, siendo esta suposición falsa, lo que provoca que la carga aumente considerablemente y el fenómeno de intercambio de calor entre espacios colindantes sea incorrecto.

La validación del modelo tendrá un proceso de ensayo-error por el cual se realizarán simulaciones a medida que se cambian los parámetros del modelo inicial, hasta alcanzar los datos válidos para considerar que el modelo representa fielmente la realidad actual del aula.

Se procede a reinterpretar estos valores, suponiendo que las aulas tienen unos datos similares a los del aula del caso de estudio, por lo que se dejan igual y que los pasillos, al ser una zona de tránsito, tienen una densidad de ocupación y una carga de ordenadores nula.

En cuanto a los despachos, se estima una ocupación de 2 personas, por lo que se calcula su densidad de ocupación en relación al área de los mismos ( $22,7 \text{ m}^2$ ), obteniendo un valor de 0,08 personas por metro cuadrado, valor casi tres veces menor al que se le había asignado anteriormente.

Se procede igual con la carga de los ordenadores, considerando que existen únicamente 2 ordenadores, por lo que, a 250 W por cada uno de ellos, hay una carga de  $22 \text{ W/m}^2$  en los despachos, más de la mitad de la anteriormente considerada.

Además, también se tienen en cuenta la influencia de las persianas, algo que en modelo inicial se había ignorado y que influye de manera considerable en el ambiente térmico del aula, por lo que se procede a crearlas en el modelo y a establecer sus características.

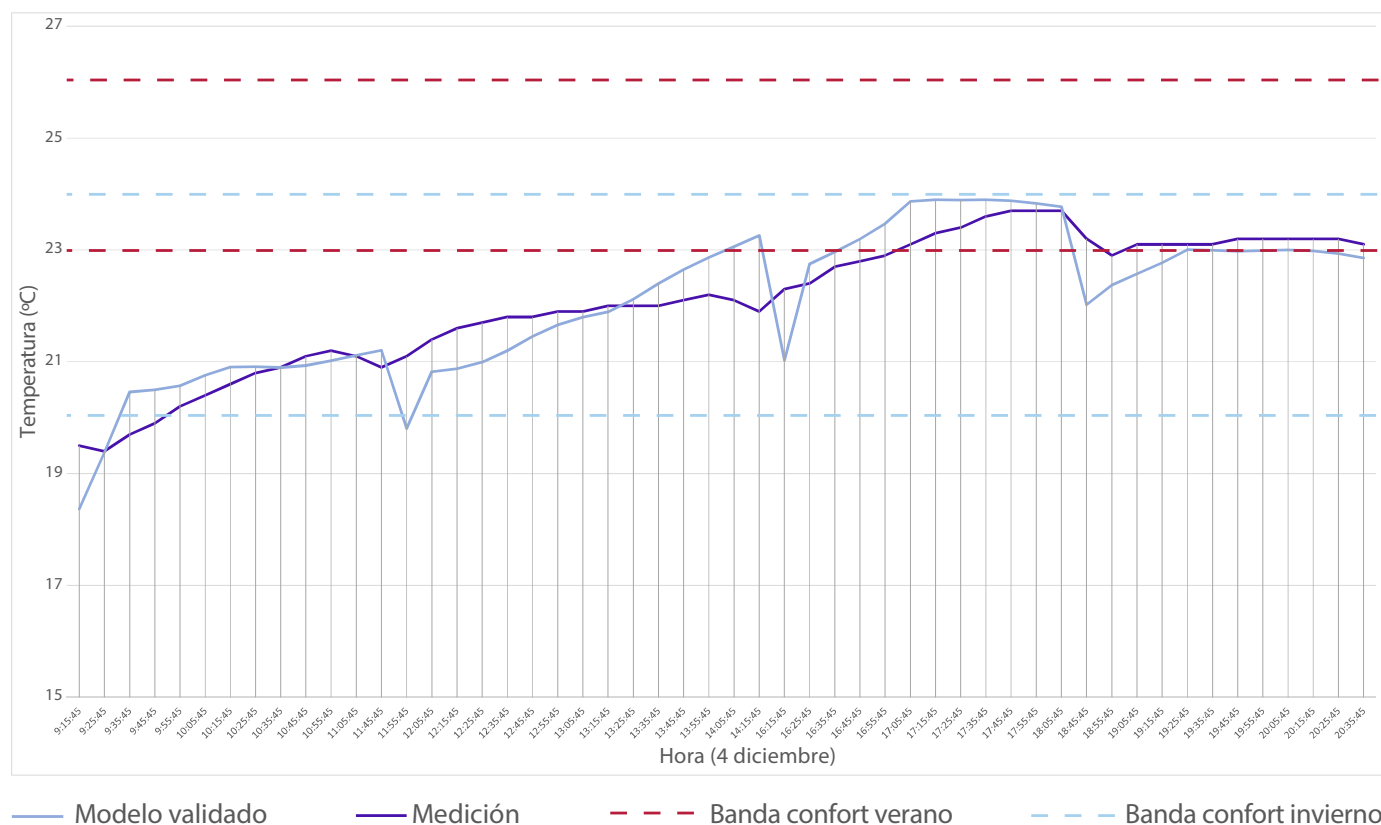
Aún con estas modificaciones, al realizar de nuevo la simulación, los datos obtenidos seguían sin concordar con los de las mediciones. Por lo tanto, se ha procedido a establecer las diferentes casuísticas de ocupación y de las cargas de los ordenadores según la hora y el día, ya que se observó que se había cometido el error de establecer una ocupación y una carga de equipos continuas, lo que hacía que la carga aumentase notablemente y, por tanto, la temperatura no se correspondiese y fuese mucho mayor que la que se midió en el aula.

Se editan los horarios con sus respectivos valores por defecto que se establecían en el programa, todos continuos, estableciendo los reales que se midieron, que podemos ver en las tablas del anejo relativas a las mediciones. Se realizan entonces diferentes casos y simulaciones para cada uno de los días en los que se realizó la medición y de los cuales se tienen datos.

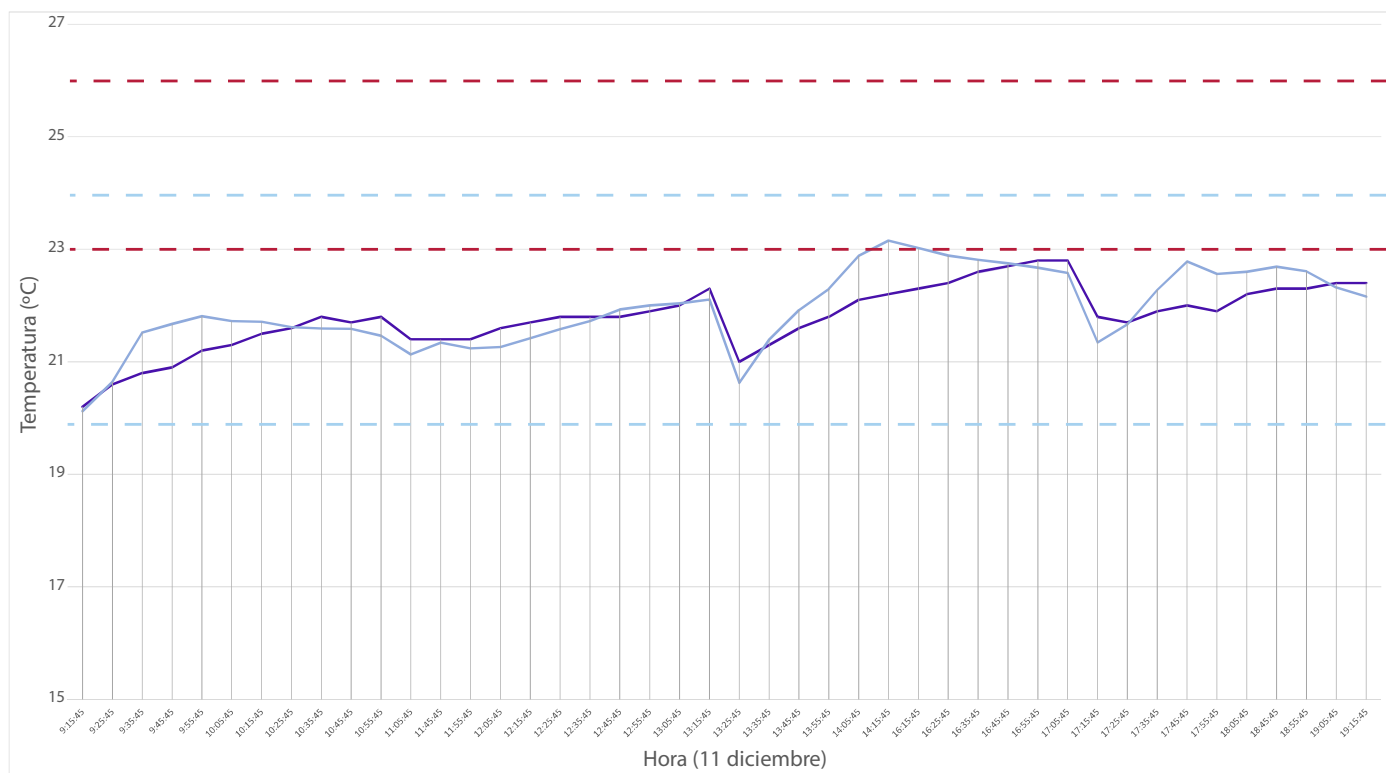
Además, se cambian los valores de ocupación y de carga de ordenadores, en los que se había introducido el valor de la media, siendo realmente necesario establecer el valor máximo y modular su valor en función de la hora y el día. Por lo tanto, la carga por ocupación pasa a ser 0,32 personas/m<sup>2</sup> y la carga por ordenadores pasa a ser 80 W/m<sup>2</sup>.

Finalmente, se consigue de este modo unos resultados que se asemejan con los de las mediciones cuanto a la temperatura (ver gráficas 10, 11 y 12), cuya variación máxima es de 1,3°C (cualquiera de los 3 días). Sin embargo, este ajuste provoca que la humedad relativa se dispare en algunos casos, en concreto, en el caso del 4 de diciembre, pero, para el tipo de estudio que se está haciendo y la dificultad de ajustar estos valores, se toma por válido el modelo teniendo en cuenta únicamente la temperatura.

El archivo climático de Sevilla del programa Design Builder es de 2002, como se puede ver en las tablas generadas, adjuntas en el anejo, por lo que puede que los datos de humedad exterior, así como el resto, sean algo diferentes a los del día de la medición, por lo tanto, se da por válido el modelo comparando sólo la temperatura. Tampoco se hace con el CO<sub>2</sub>, ya que el programa solo la proporciona a nivel de todo el edificio. Por lo tanto, se adjuntan en esta página únicamente las gráficas relativas a la temperatura, aunque en el anejo se incluyen también las gráficas de humedad y las tablas con ambos datos.

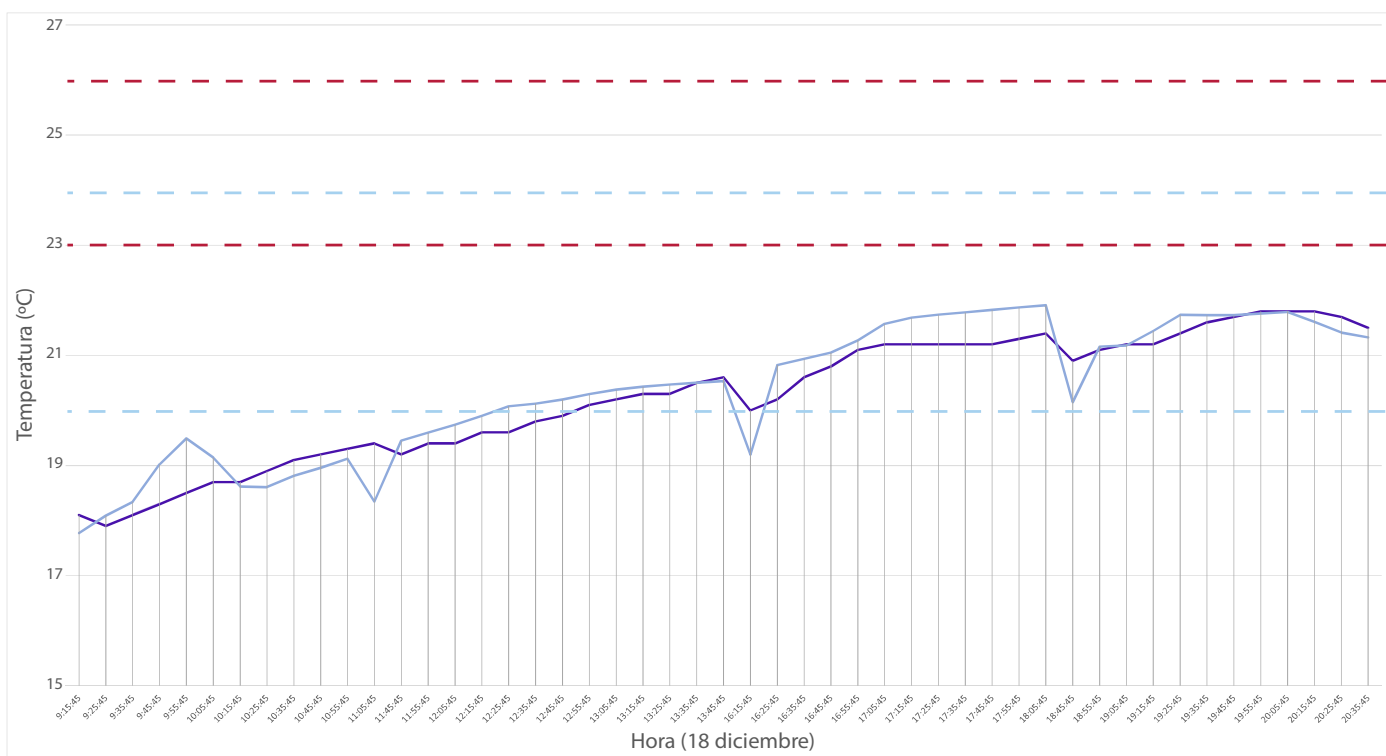


GRÁFICA 10. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



Modelo validado Medición Banda confort verano Banda confort invierno

GRÁFICA 11. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



Modelo validado Medición Banda confort verano Banda confort invierno

GRÁFICA 12. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

## Propuestas pasivas de rehabilitación energética

Para comprobar la evolución de las condiciones ambientales en los espacios interiores de los edificios, es necesario tener en cuenta y valorar los criterios de diseño que se han mencionado en apartados anteriores, así como las normativas existentes, durante el proceso de proyectar, para así garantizar que se produzcan una vez construido.

En todo caso, en edificios ya consolidados donde estas condiciones no se producen, es posible conseguir establecerlas sin necesidad de tener que utilizar las máquinas de acondicionamiento para ello. Estas técnicas para conseguir un ambiente térmico confortable se denominan medidas pasivas de rehabilitación energética.

Partiendo del modelo ya validado, según se ha visto anteriormente, se dispone a crear, mediante las variaciones necesarias sobre el mismo, un nuevo modelo, mejorado, en el que se aseguren unas condiciones ambientales lo más cercanas al confort térmico en el interior del aula 4.08. Para ello se han utilizado medidas pasivas de rehabilitación, que se aplican al modelo validado, para valorar si existe, y en que medida, una mejora en las condiciones térmicas del aula en cuestión.

Analizando las condiciones actuales del aula, observamos la carencia de aislamiento térmico en su envolvente, así como unas ventanas con poco grosor de vidrio. También se puede observar en los datos de Design Builder una alta pérdida de carga por infiltraciones y por transmisiones a través las particiones interiores y ganancias por radiación solar e iluminación, aunque las más altas son las debidas a la ocupación y a los ordenadores.

Por lo tanto, se irán elaborando distintas hipótesis de rehabilitación energética, que se irán complementando entre ellas hasta llegar a establecer unas condiciones ambientales lo más cercanas posible al confort térmico en el interior del aula 4.08. Las hipótesis de las distintas medidas pasivas que se han aplicado al modelo son las siguientes:

- Hipótesis 1: Aplicación de una fachada ventilada.
- Hipótesis 2: Sustitución de los vidrios y marcos de las ventanas.
- Hipótesis 3: Ventilación natural.
- Hipótesis 4: Disposición de lamas de protección solar en los huecos de la fachada.

### Hipótesis 1

Para empezar, añadiendo a la plantilla del cerramiento 3 nuevas capas por el exterior, se introduce los nuevos materiales que forman la fachada ventilada. Se establece entonces una nueva fachada de 12 cm de espesor total, que se dispone mediante la aplicación de espuma de poliuretano proyectado (PUR), de 7 cm de espesor, sobre la fachada anterior del edificio compuesto por fábrica de ladrillo. A continuación, se dejan 2 cm de cámara de aire ventilada y, finalmente, se establece un aplacado cerámico de 3 cm de grosor como revestimiento exterior, anclado a la antigua fachada de fábrica de ladrillo.

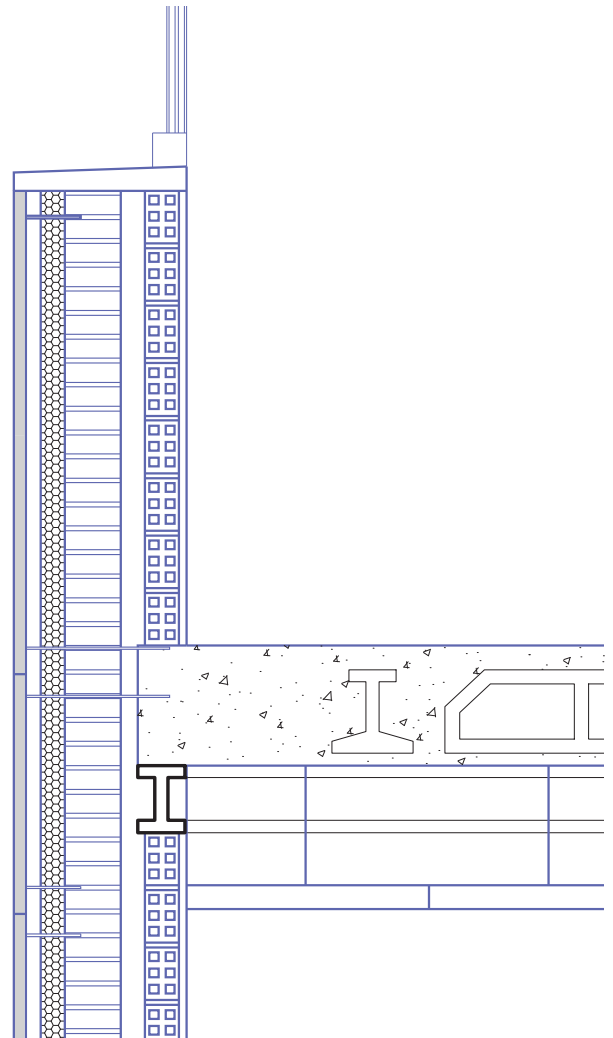


FIGURA 40. Detalle de la fachada rehabilitada tras la aplicación de la nueva fachada ventilada. Figura elaborada por autor.

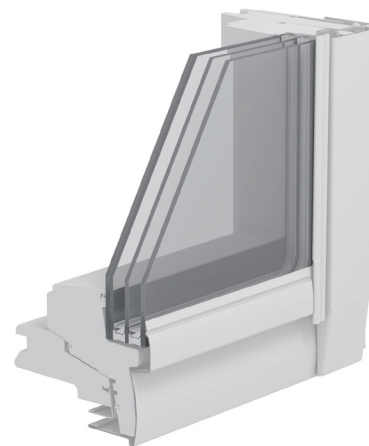


FIGURA 41. Detalle de ventana con vidrio triple y marco con rotura de puente térmico. Fuente: <http://www.archiexpo.es>



Categoría	l/s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

FIGURA 42. Caudales mínimos de aire exterior. Fuente: Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. Figura editada por autor.



FIGURA 43. Lamas de aluminio para protección solar de fachadas. Fuente: <http://www.archiexpo.es>. Figura editada por autor

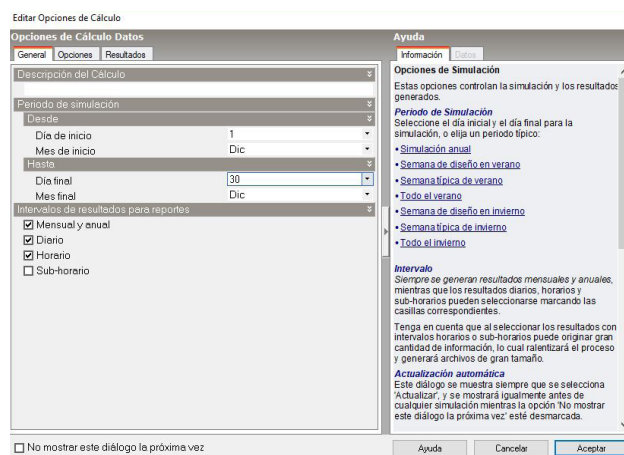


FIGURA 44. Cuadro de diálogo para establecer las condiciones de simulación en el programa Design Builder.

## Hipótesis 2

Para reducir las pérdidas que se producen a través de los huecos de fachada, se procede a cambiar las ventanas del aula en cuestión, así como las de los espacios adyacentes a la misma, estableciendo unas ventanas con un vidrio de triple hoja, de 4, 6 y 4 milímetros y con cámaras de aire de 13 mm entre cada una de las hojas. Por otro lado, también se sustituyen los marcos actuales por unos de aluminio con rotura e puente térmico.

## Hipótesis 3

En cuanto a la ventilación natural, se establece una hipótesis por la cual se supone la aplicación del caudal de aire de ventilación mínimo para espacios docentes (IDA 2) ocupadas habitualmente, correspondiente a 12,5 l/s por persona <sup>(31)</sup>.

Esta hipótesis tendrá variaciones según la época del año en la que se establezca, ya que, en verano, será conveniente ventilar por las noches para poder enfriar el aula, mientras que en invierno será mejor ventilar únicamente cuando el aula se encuentra ocupada, para que así el aula no esté enfriada antes de ser ocupada.

## Hipótesis 4

Como última medida de rehabilitación energética, se propone establecer lamas de protección solar que, además de reducir la carga por radiación solar, permitan desestimar la utilización continua de las persianas, que en las aulas de la ETSA, por experiencia propia, se encuentran siempre en la misma posición, siendo ésta, normalmente, cerradas en su totalidad o hasta la mitad.

Por lo tanto, se establecen unas lamas de 50 cm en las ventanas de la fachada sur del edificio, haciendo, además, una estimación de que las persianas están totalmente abiertas todo el día, algo que también reducirá la carga y el consumo energético de la iluminación, que, anteriormente, al estar las persianas siempre en uso, era mayor de lo habitual.

A medida que se han ido aplicando estas medidas para mejorar las condiciones ambientales, se han ido realizando simulaciones en el programa para poder ver los resultados tras las modificaciones. Finalmente, con esta última se realizó una última simulación del modelo mejorado cuyos resultados se van a analizar en el siguiente apartado.

La simulación del modelo se ha realizado con la intención de obtener los resultados ambientales de los horarios en los que el aula está ocupada durante los meses de diciembre, marzo, junio y octubre, a modo representativo de cada una de las cuatro estaciones del año. Se realizarán, por tanto, cuatro simulaciones diferentes y se contemplarán los resultados por separado, debido a que las condiciones de confort varían según la estación y a que se adoptaran algunas medidas diferentes según el caso, como puede ser el ventilar durante la noche en verano, como ya se ha comentado anteriormente. De este modo, se podrán valorar los resultados de los días con temperaturas más representativas, tanto frías como cálidas, pudiendo así extrapolar los resultados obtenidos al resto de días del año.

<sup>(31)</sup> - Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, (2007).

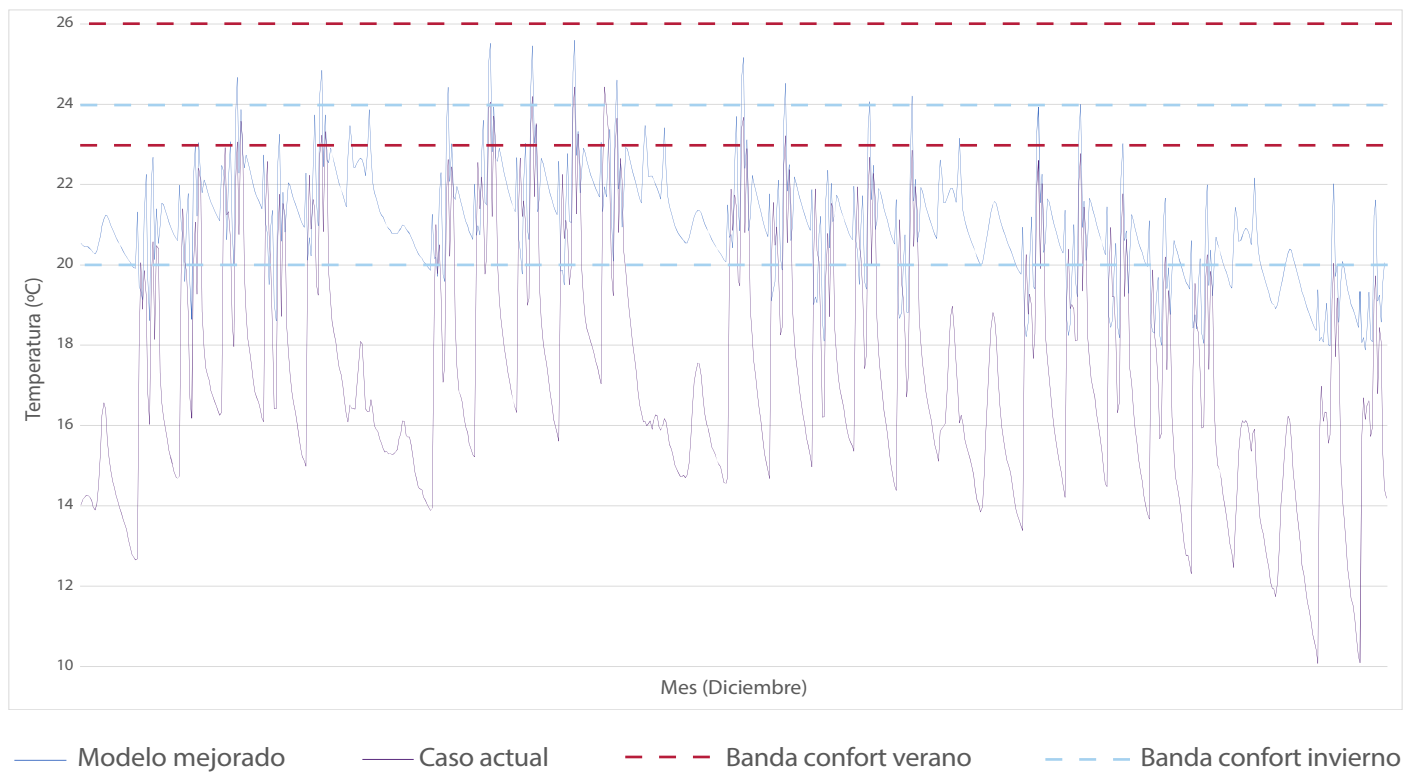
## Análisis del modelo mejorado

Una vez realizada la simulación del modelo mejorado en las distintas etapas anteriormente mencionadas, se procede a analizar en que medida ha cambiado con respecto a las condiciones de confort del caso actual. Para ello, se han vuelto a utilizar las gráficas que genera el software Design Builder al realizar la simulación. Éstas aportan ahora información nueva sobre la humedad relativa y la temperatura interior del aula tras la aplicación de las medidas pasivas de rehabilitación. La cantidad de CO<sub>2</sub> se ha desestimado, ya que el programa permite obtener resultados del mismo únicamente a nivel de todo el edificio, que en ningún momento será igual que la del aula. Los resultados de las simulaciones, tanto del caso actual como del modelo mejorado, para los meses de diciembre, marzo, junio y octubre se adjuntan al completo en el anejo correspondiente del modelo mejorado. La intención al aplicar las medidas pasivas de rehabilitación era mejorar las condiciones, logrando un ambiente lo más aproximado al confort térmico en el interior del aula en condiciones de libre evolución, el cual está estimado en unos 20-24 °C para el periodo de invierno y unos 23-26 °C en verano, con una humedad relativa entre el 30 y el 70% para los dos casos.<sup>(32)</sup>

Con la combinación de las hipótesis establecidas en el apartado anterior, se obtienen resultados que se aproximan a los estándares de ambiente térmico confortable para el mes de diciembre, mejorando notablemente los resultados actuales (ver gráfica 13), aunque en determinados momentos no se cumplen ya sea por superar los 24 °C de máxima o no alcanzar el mínimo de 20 °C o por no estar la humedad relativa dentro del rango establecido (ver gráfica 17), pero, en general, los parámetros exigibles para un ambiente confortable se cumplen la mayor parte del tiempo.

Para el mes de marzo, sin embargo, los datos resultantes se alejan de las condiciones exigidas para un ambiente confortable (ver gráfica 14), alzándose temperaturas muy elevadas en el horario de tarde, cercanas a los 30 °C, y siendo muy diferentes los resultados a medida que avanza el mes, por lo que a finales del mes es necesario ventilar durante la noche como si fuese verano. Además, la humedad relativa también tiene varios momentos en los que no se encuentra en el rango de confort, pero aún así, se mejoran las condiciones actuales (ver gráfica 18).

Tampoco se ha logrado conseguir resultados ni mucho menos cercanos al confort térmico para la simulación del mes de junio (ver gráfica 15), ni si quiera realizando una prueba desestimando las cargas de ocupación y equipos, que son las que más calor aportan y las que hacen que en los meses anteriores, que no son tan calurosos, se superen temperaturas de 25°C. Con la hipótesis de ventilar por las noches se consigue que el aula esté a unos 22 °C a las 9:00 h, cuando el aula comienza a ocuparse, pero basta una hora para que se alcancen los 26 °C los días más calurosos, máxima temperatura del rango de confort para verano, alcanzándose temperaturas cercanas a los 35 °C en algunos momentos puntuales, por lo que se producen muy pocas situaciones de confort ambiental.



GRÁFICA 13. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.

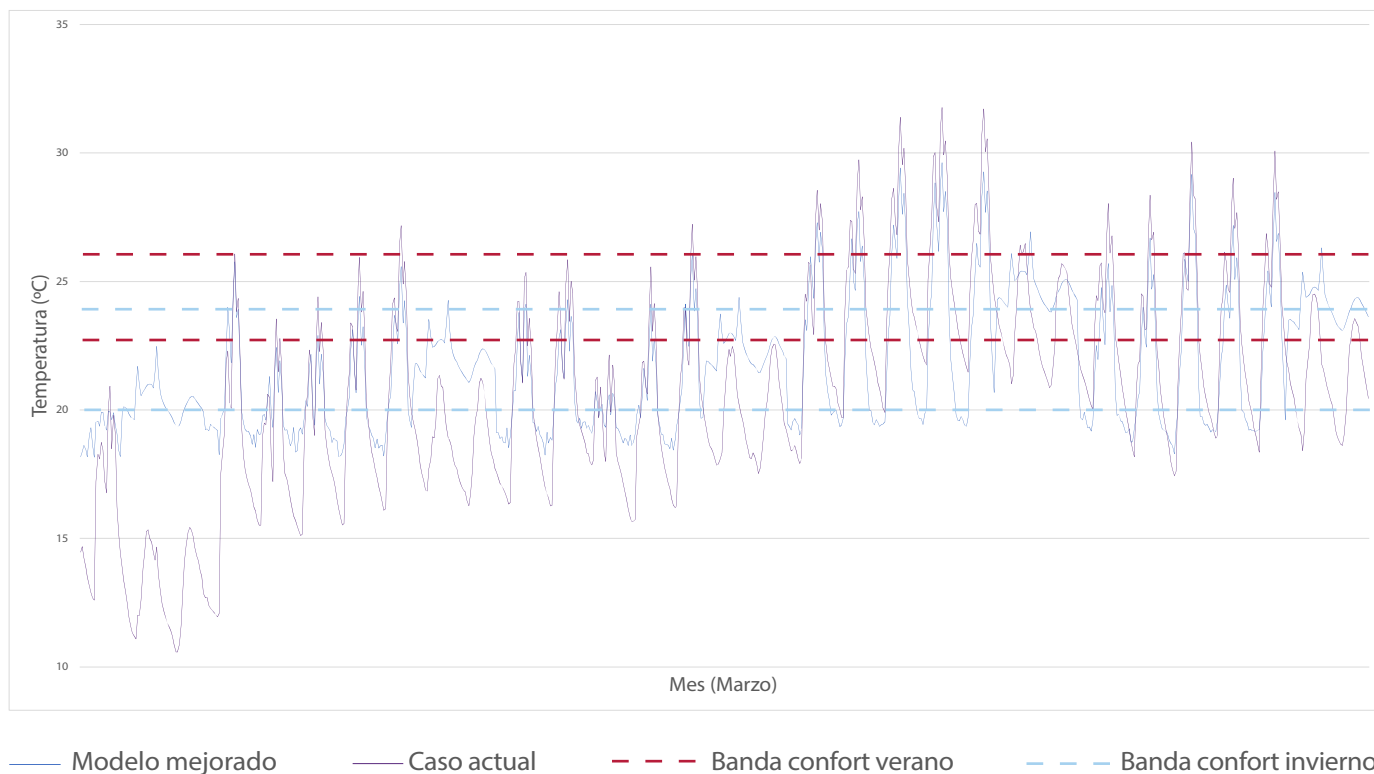
<sup>(32)</sup> - UNE-EN ISO 7730, (2006).

Finalmente, la simulación del mes de octubre vuelve a resultar insatisfactoria (ver gráfica 16). Se toma la hipótesis de ventilación de verano debido a las altas temperaturas que se alcanzan, pero aún así, el confort solo consigue darse en los primeros momentos de la mañana, si consideramos el rango de verano, para luego dispararse la temperatura a medida que avanza el día hasta alcanzar temperaturas superiores a los 30 °C.

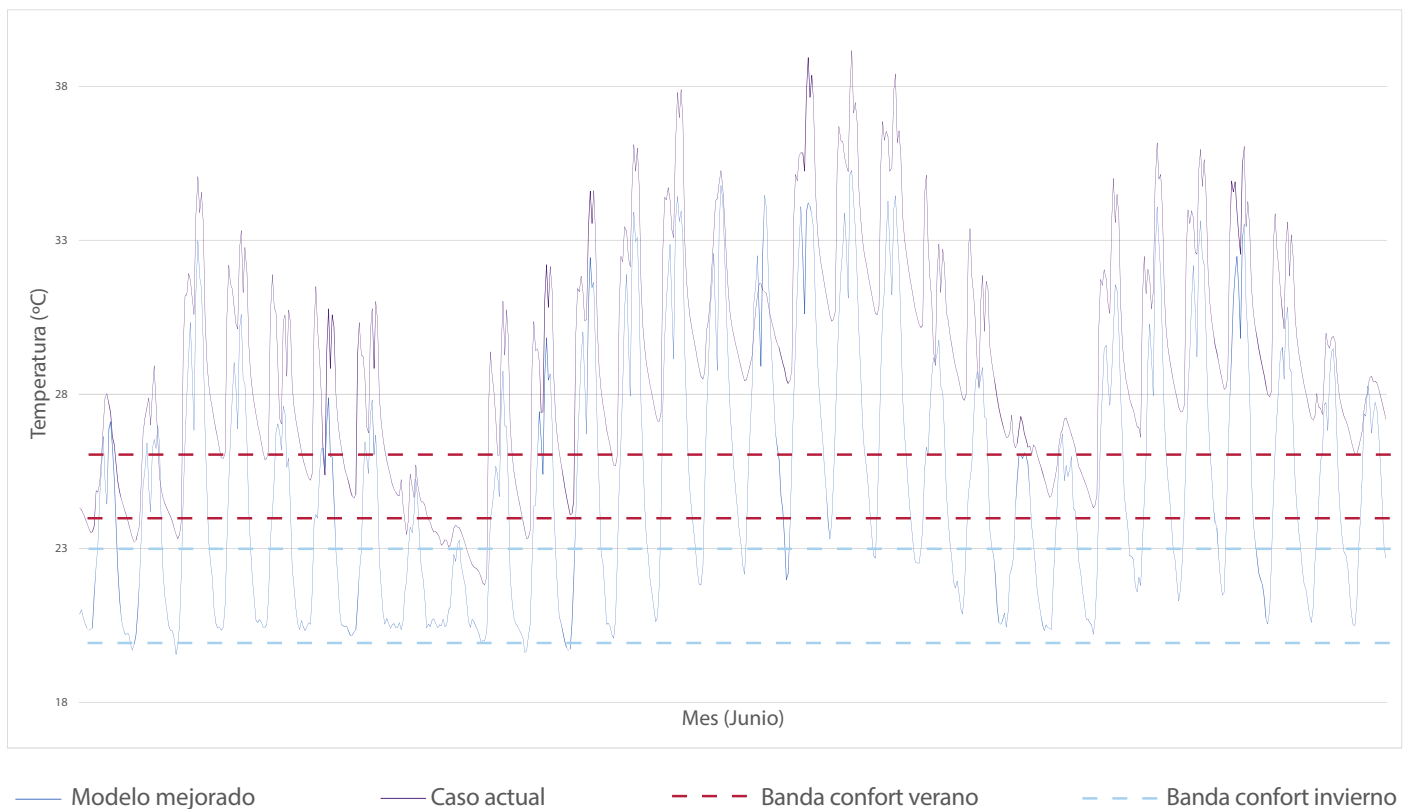
En todo caso, aún con los resultados obtenidos, que no se encuentran, en su mayoría, dentro de los rangos exigidos para un ambiente térmico confortable, se ha conseguido mejorar en todos los casos las condiciones actuales, en mayor o menor medida, con la rehabilitación energética que se ha realizado del aula, variando las temperaturas entre dos y seis grados respecto a la actual en todos los meses y en la mayor parte del tiempo, disminuyendo cuando se producían temperaturas por encima de los 25 °C y aumentando cuando eran menores de 20°C, generalmente.

Se puede decir, por tanto, que el efecto que se ha generado a provocado que aumenten las temperaturas, menos en junio, a principios de octubre y finales de marzo, que se disminuyen, debido a que el efecto de la nueva fachada que se incorpora, a parte de aislar en mayor medida el aula de las temperaturas exteriores, provoca un cierto efecto de estanqueidad, que no permite disipar la temperatura a través de los muros. Con lo cual, las grandes cargas que se generan en el interior, como ya se ha comentado, debido a la ocupación, equipos e iluminación, se quedan en cierto modo "atrapadas" en el interior del aula, provocando temperaturas impropias a determinadas estaciones. La ventilación constante del aula hace que esta situación mejore y se equilibre, generando unas condiciones confortables durante varios periodos, pero, a ciertas horas donde estos parámetros alcanzan valores muy altos (por la tarde), no es suficiente con ello para lograr que se produzcan unas condiciones ambientales de confort térmico constantes. Además, debido a las altas temperaturas veraniegas que se dan en Sevilla, incluso por la noche, resulta muy complicado conseguir el confort ambiental sin utilizar ningún método de refrigeración. Además, también resulta necesario, en algunos casos, calentar el aula durante el invierno, ya que, durante las primeras horas de la mañana, se obtienen temperaturas por debajo de los 20 °C. Incluso sería necesario enfriar en determinadas ocasiones, cuando se alcanzan valores por encima de los 25 °C durante algunos periodos de la tarde.

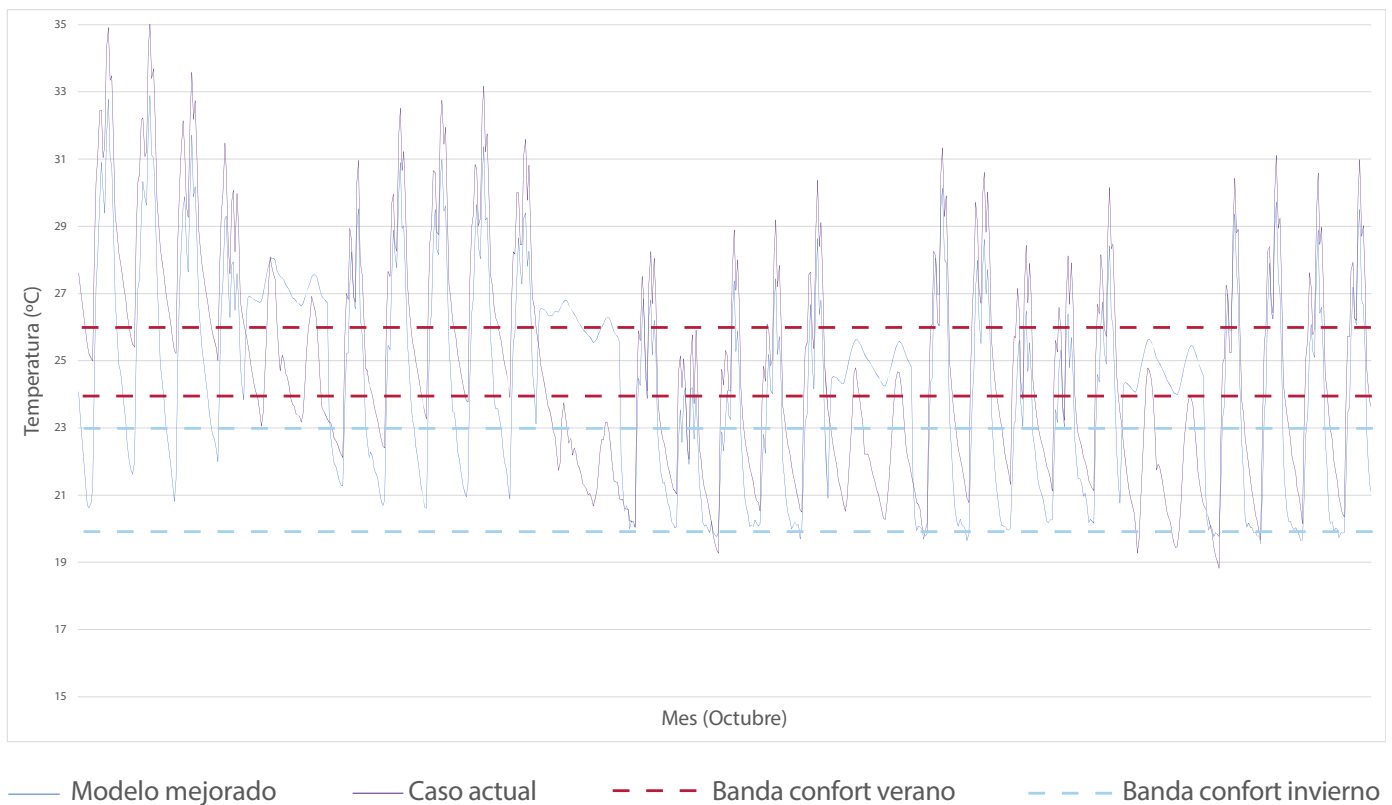
Cabe destacar la importancia que podría tener una ligera variación de cualquiera de las hipótesis que se han tomado para que las condiciones ambientales varíen, así como la dependencia del factor humano en las mismas, suponiendo que éste cumplirá las hipótesis establecidas y, por ejemplo, no aumentará la ocupación máxima, no aportará más carga debida a equipos no contemplada, llevará la ropa adecuada para cada estación, o no ejercerá una actividad que implique una tasa metabólica impropia de la normalizada para un aula docente.



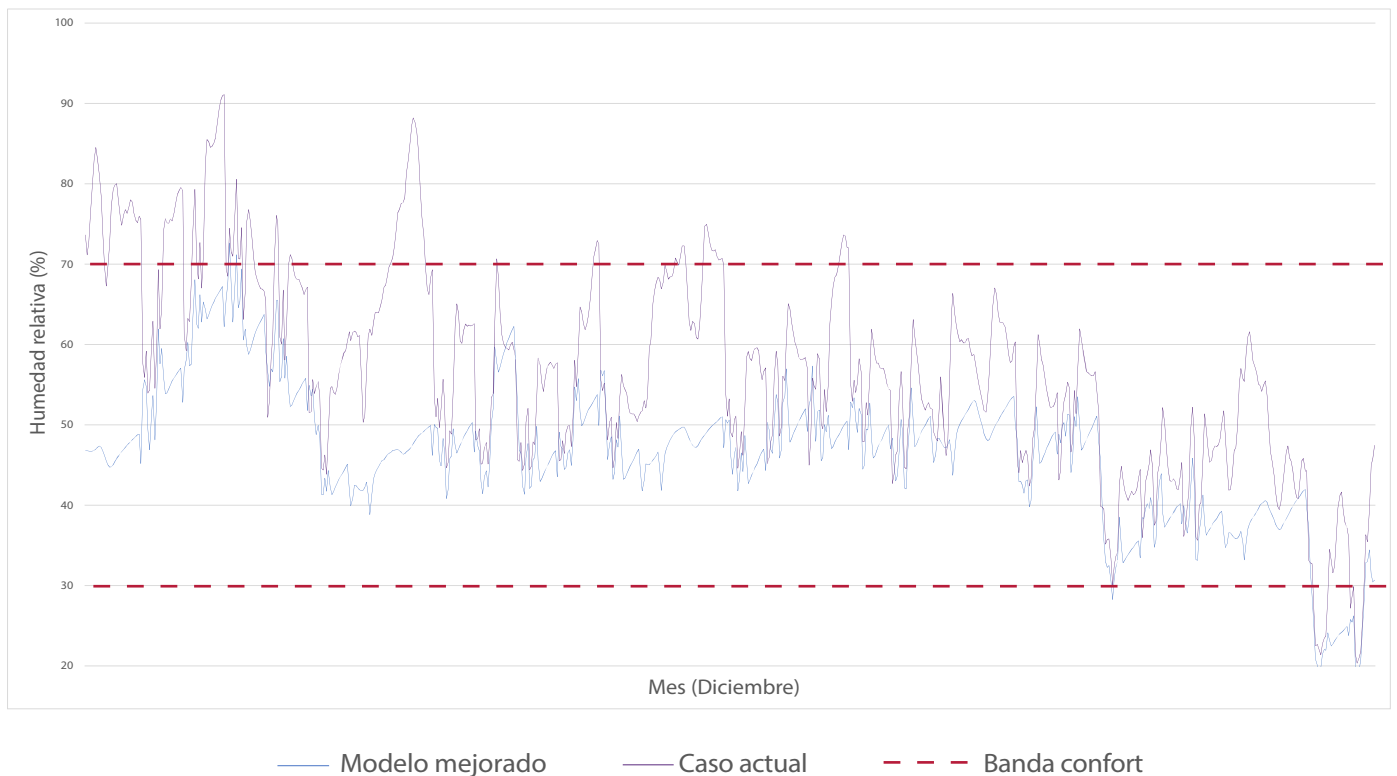
GRÁFICA 14. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de marzo. Gráfica elaborada por autor.



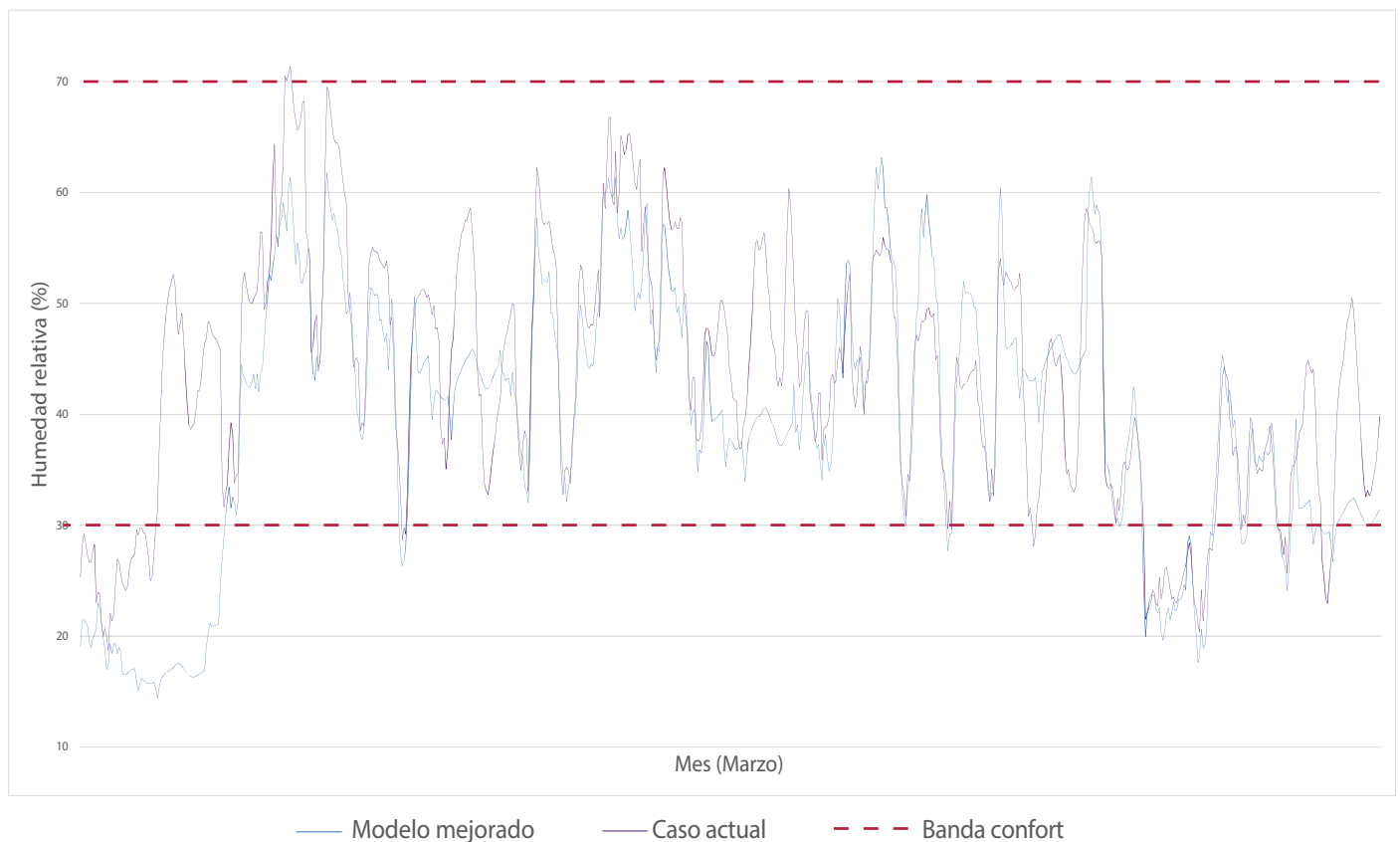
GRÁFICA 15. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.



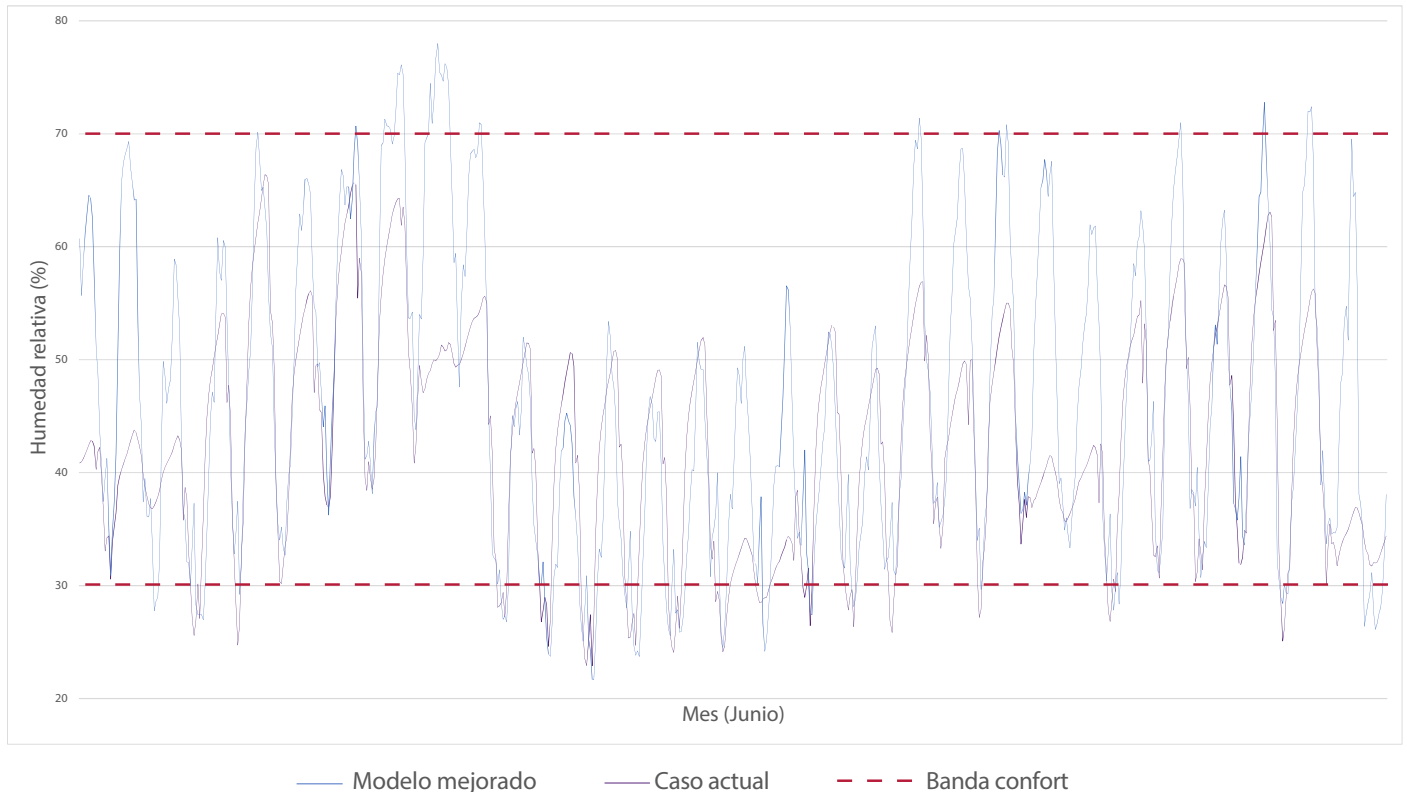
GRÁFICA 16. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de octubre. Gráfica elaborada por autor.



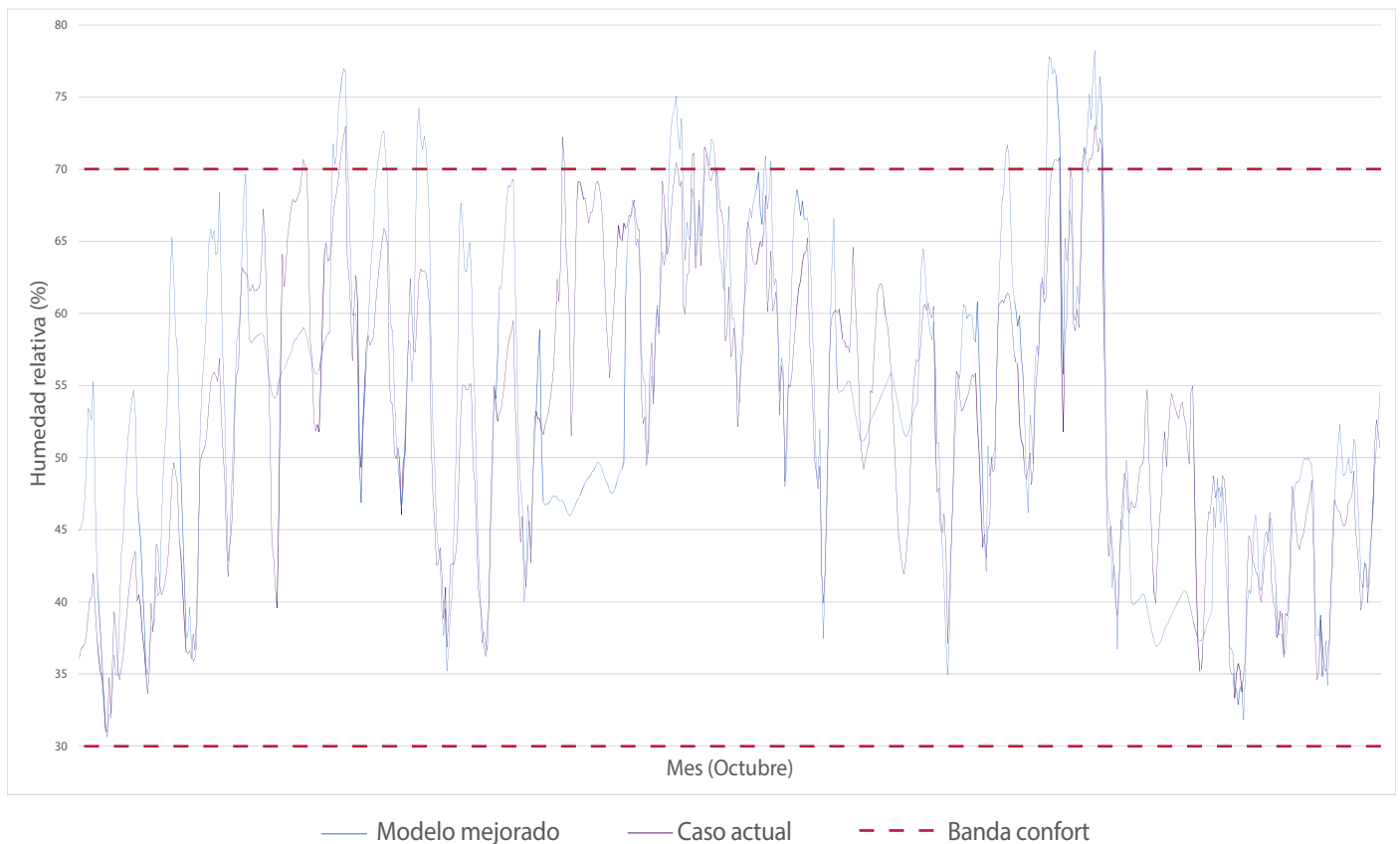
GRÁFICA 17. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de diciembre. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 18. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de marzo. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 19. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 20. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de octubre. Gráfica elaborada por autor.

## Conclusiones generales

Tras la finalización del proceso del caso de estudio y conseguir establecer un método estándar para la rehabilitación energética de un aula docente superior en clima mediterráneo, se procede a extraer conclusiones del resultado y del estudio en sí mismo.

Para empezar, resulta destacable la gran importancia que ejercen la ocupación y los equipos electrónicos, en este caso ordenadores, sobre las condiciones ambientales, siendo unos de los parámetros que más carga generan en el interior del aula y que hacen que en días fríos puedan alcanzarse temperaturas superiores al máximo establecido para el confort, y mucho más altas que en el exterior, y que en días cálidos, en determinadas ocasiones, haga incluso más calor en el interior que en el exterior.

En general, esto debería ser poco significativo debido a que es algo que suele ser más o menos constante en los diferentes espacios y podría tenerse en cuenta desde un principio y solucionarse. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, estos parámetros varían notablemente de un día para otro, entre la mañana y la tarde, e incluso de una hora a otra. Esto es debido a que se trata de una aula con diferentes números de alumnos entre los horarios de mañana y tarde (casi el doble por la tarde), en el que hay clases, según el día, en las que todos los alumnos utilizan ordenador y otras en las que no, etcétera. Todas estas variaciones complican la regulación de estos parámetros, tan importantes para el ambiente térmico, para poder cuantificarlos y establecer unos valores habituales y calcular sus necesidades para lograr el confort térmico. Esto evidencia la necesidad de disipar la carga interna en los espacios docentes. En invierno resulta favorable ya que calienta el aula, pero en verano es necesario evacuarla mediante sistemas activos, ya que en el clima mediterráneo no existen fuente de frío naturales durante esta época.

No obstante, con el desarrollo de mejoras para la rehabilitación energética que se han realizado en este trabajo, se ha conseguido establecer una base para, si se cumplen las condiciones estándar de ocupación y uso, poder garantizar acercar las temperaturas al confort térmico en el interior del aula en la mayor parte del horario ocupado, incluso cumplirlas en mayor o menor medida, y, en todo caso, mejorar las condiciones actuales del caso de estudio y reducir la demanda (ver figuras 45 y 46). Adoptar estas medidas pasivas ha supuesto aumentar la temperatura entre 2 y 6 °C en invierno y disminuirla entre 2 y 4 °C en verano, suponiendo esto una variación media del 25% y del 14%, respectivamente. En cuanto a la humedad relativa, al ser la banda de confort tan amplia es difícil cuantificar la existencia de una mejora. En las gráficas se puede comprobar (ver gráficas 17-20) que en diciembre disminuye y en el resto de meses aumenta, estando la mayor parte del tiempo dentro de la banda de confort.

Se puede concluir, tras analizar los datos obtenidos, que el gran problema del caso de estudio escogido es el exceso de calor. Se alcanzan temperaturas superiores a 26 °C incluso en épocas de invierno, y cercanas a 35 °C durante determinados momentos en verano, a pesar de la aplicación de las medidas de rehabilitación energética. Esto es debido en gran parte al clima de la ciudad y, como se ha dicho anteriormente, a las altas y variadas cargas generadas por la ocupación y los ordenadores, que se acumula en el interior del aula debido, posiblemente, a la estanqueidad de la misma.

### CASO ACTUAL

	DICIEMBRE	JUNIO	MARZO	OCTUBRE
Horas de confort temperatura(%)	19%	20%	35%	30%
Horas de confort HR(%)	81%	83%	84%	94%

FIGURA 45. Cuadro cuantitativo de las horas de confort de la temperatura y la humedad relativa durante los diferentes meses simulados del caso actual, calculados mediante Excel a partir de los datos aportados por Design Builder. Figura elaborada por autor.

### MODELO MEJORADO

	DICIEMBRE	JUNIO	MARZO	OCTUBRE
Variación media T <sup>a</sup> (%)	25%	14%	13%	8%
Variación media HR (%)	17%	9%	14%	9%
Horas de confort temperatura(%)	77%	23%	57%	35%
Horas de confort HR(%)	95%	85%	78%	92%

FIGURA 46. Cuadro cuantitativo de las variaciones y mejoras de la temperatura y la humedad y de las horas de confort durante los diferentes meses simulados del modelo mejorado, calculados mediante Excel a partir de los datos aportados por Design Builder. Figura elaborada por autor.



Por lo tanto, en general, hay que buscar el enfriamiento del aula en la mayoría de los casos, y, en épocas de primavera - verano, e incluso otoño, resulta imposible sin utilizar mecanismos activos de acondicionamiento y sin tratar el aire de ventilación exterior en verano, ya que si no lo único que produciría sería un aumento de la carga interior, al ser tan elevadas las temperaturas, en general, y especialmente durante el verano en el clima mediterráneo.

### Líneas futuras de estudio

Para ampliar el contenido de este estudio y que así tenga más relevancia, se podría aplicar el mismo procedimiento seguido con la variación de partir de unas mediciones de las condiciones ambientales tomadas durante el clima de verano, validando el modelo con esas características, ya que, el clima de Sevilla en verano es mucho más extremo y desfavorable que el invierno, como ya se ha comentado. Esto haría que la validación del modelo resultase mucho más fiable para, a la hora de establecer las medidas de rehabilitación energética, se garantizase su veracidad respecto al caso más desfavorable que atiende a este caso de estudio, el clima de verano.

El siguiente paso a este estudio sería conseguir las condiciones de confort ambiental que se estaban buscando, siendo por tanto necesario aplicar medidas activas de acondicionamiento. Por ejemplo, podría estudiarse en qué medida variarían las condiciones tratando térmicamente el aire de ventilación natural, añadiendo ventilación mecánica, calefactando o refrigerando según fuese necesario pero únicamente durante los horarios ocupados, etcétera. Con esto, se podría continuar con el estudio cuantificando la medida en que la demanda de climatización se puede ver reducida respecto con la actualidad.

A partir de ahí, podría valorarse la rentabilidad de la aplicación de las medidas pasivas que se han propuesto en este trabajo, que, a priori, con las variaciones y las mejoras que se han producido con la hipótesis de libre evolución, parece que el gasto que supondría la aplicación de estas medidas no es proporcional a la mejoría que provocan. Sin embargo, con el análisis y el estudio de estas nuevas líneas, combinando medidas pasivas y activas, podría analizarse la reducción que se produce en el consumo de energía gracias a la aplicación de las mismas y valorar de manera más certera si resulta viable su aplicación.

Además, también podría complementarse conociendo y estableciendo hipótesis de ocupación y carga de equipos máximas y mínimas, para así poder entender mejor el funcionamiento del aula y, solucionando las condiciones más desfavorables, poder abordar su rehabilitación energética con la garantía de intentar establecer unas condiciones de confort durante el mayor periodo de tiempo posible, así como una mayor reducción de la demanda energética. También sería interesante comprobar con los datos de éste modelo, si, cambiando las características climáticas por las de otra ciudad, se seguirían mejorando las condiciones respecto con la actualidad, o incluso si se conseguiría el confort térmico sin necesidad de utilizar elementos activos de acondicionamiento, y qué modificaciones serían necesarias para que esto ocurriese.

## Mediciones

Date:	Time:	CO <sub>2</sub> (ppm):	T <sup>a</sup> (°C):	R. Humidity (%):	Dew Point (°C):	Observaciones
04/12/2018	9:15:45	645	19,5	48,2	8,3	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	9:25:45	682	19,4	49,4	8,5	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	9:35:45	834	19,7	50,7	9,2	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	9:45:45	988	19,9	52,2	9,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	9:55:45	1117	20,2	52,9	10,3	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:05:45	1221	20,4	53,2	10,6	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:15:45	1338	20,6	53,4	10,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:25:45	1404	20,8	53,3	11	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:35:45	1328	20,9	52,4	10,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:45:45	1397	21,1	52,4	11	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	10:55:45	1482	21,2	52,4	11,1	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	11:05:45	970	21,1	49,1	10	Desocupado
04/12/2018	11:15:45	765	20,9	47,8	9,4	Desocupado
04/12/2018	11:25:45	742	20,8	48	9,4	Desocupado
04/12/2018	11:35:45	706	20,8	47,9	9,4	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	11:45:45	916	20,9	49,1	9,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	11:55:45	1000	21,1	49,7	10,2	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:05:45	1230	21,4	50,9	10,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:15:45	1379	21,6	51,6	11,2	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:25:45	1375	21,7	51,5	11,3	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:35:45	1196	21,8	50,6	11,1	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:45:45	1069	21,8	49,7	10,8	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	12:55:45	1035	21,9	49,7	10,9	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:05:45	1047	21,9	49,8	11	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:15:45	1087	22	49,9	11,1	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:25:45	1033	22	49,5	11	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:35:45	1137	22	50,4	11,2	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:45:45	1129	22,1	50	11,2	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	13:55:45	1165	22,2	50,1	11,3	Ocupado (12 alumnos)
04/12/2018	14:05:45	1158	22,1	50,4	11,3	Desocupado (12 alumnos)
04/12/2018	14:15:45	1274	21,9	51,4	11,4	Desocupado (12 alumnos)
04/12/2018	16:15:45	1005	22,3	50,7	11,6	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	16:25:45	1225	22,4	52,8	12,3	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	16:35:45	1462	22,7	53,9	12,9	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	16:45:45	1697	22,8	55	13,3	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	16:55:45	1918	22,9	55,8	13,6	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:05:45	2142	23,1	56,5	14	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:15:45	2341	23,3	57	14,3	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:25:45	2512	23,4	57,7	14,6	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:35:45	2703	23,6	58,3	14,9	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:45:45	2811	23,7	58,5	15,1	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	17:55:45	2923	23,7	58,9	15,2	Ocupado (20 alumnos)
04/12/2018	18:05:45	2941	23,7	58,8	15,2	Desocupado
04/12/2018	18:15:45	2334	23,6	56,4	14,4	Desocupado
04/12/2018	18:25:45	1984	23,4	54,9	13,8	Desocupado
04/12/2018	18:35:45	1754	23,2	53,8	13,3	Desocupado
04/12/2018	18:45:45	1662	23,2	53,8	13,3	Desocupado
04/12/2018	18:55:45	1665	22,9	54,3	13,2	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:05:45	1741	23,1	54,7	13,5	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:15:45	1647	23,1	54,7	13,5	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:25:45	1543	23,1	54,5	13,4	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:35:45	1462	23,1	54,2	13,3	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:45:45	1429	23,2	54	13,4	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	19:55:45	1415	23,2	53,8	13,3	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	20:05:45	1358	23,2	53,7	13,3	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	20:15:45	1270	23,2	53,3	13,2	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	20:25:45	1241	23,2	53,1	13,1	Ocupado (18 alumnos)
04/12/2018	20:35:45	1136	23,1	52,4	12,8	Ocupado (18 alumnos)

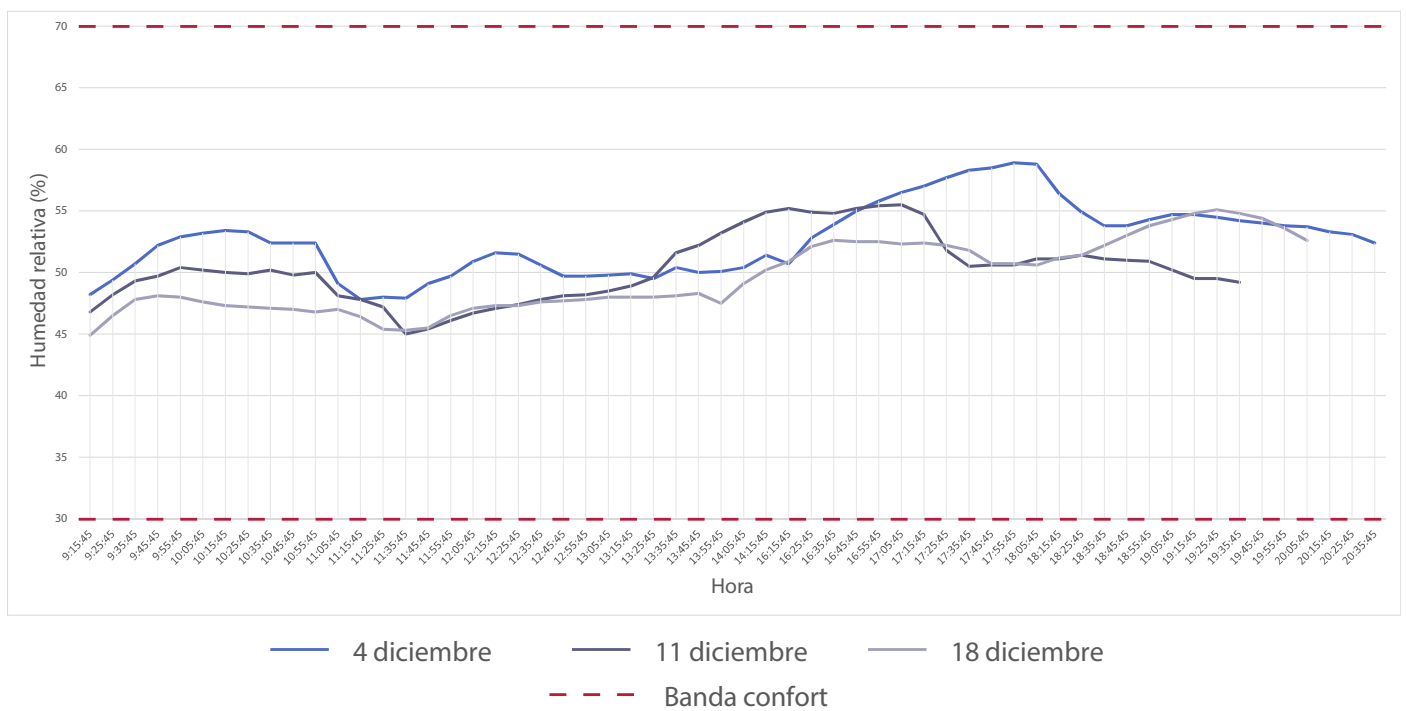
TABLA 09. Datos resultado de las mediciones realizadas en el aula 4.08 el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

Date:	Time:	CO <sub>2</sub> (ppm):	T <sup>a</sup> (°C):	R. Humidity (%):	Dew Point (°C):	Observaciones
11/12/2018	9:35:45	833	20,2	46,8	8,5	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	9:45:45	1004	20,6	48,2	9,3	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	9:55:45	1145	20,8	49,3	9,8	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:05:45	1275	20,9	49,7	10	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:15:45	1404	21,2	50,4	10,5	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:25:45	1465	21,3	50,2	10,5	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:35:45	1501	21,5	50	10,6	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:45:45	1552	21,6	49,9	10,7	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	10:55:45	1649	21,8	50,2	11	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	11:05:45	1621	21,7	49,8	10,8	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	11:15:45	1697	21,8	50	10,9	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	11:25:45	1379	21,8	48,1	10,3	Desocupado
11/12/2018	11:35:45	1316	21,7	47,8	10,2	Desocupado
11/12/2018	11:45:45	1176	21,7	47,2	10	Desocupado
11/12/2018	11:55:45	776	21,4	45	9	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:05:45	779	21,4	45,4	9,1	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:15:45	887	21,4	46,1	9,3	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:25:45	969	21,6	46,7	9,7	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:35:45	1055	21,7	47,1	9,9	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:45:45	1039	21,8	47,4	10,1	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	12:55:45	1028	21,8	47,8	10,2	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	13:05:45	1021	21,8	48,1	10,3	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	13:15:45	1016	21,9	48,2	10,5	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	13:25:45	1069	22	48,5	10,6	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	13:35:45	1214	22,3	48,9	11	Ocupado (12 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:05:45	648	20,9	49,6	10	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:15:45	745	21	51,6	10,7	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:25:45	821	21,3	52,2	11,1	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:35:45	1077	21,6	53,2	11,7	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:45:45	1329	21,8	54,1	12,1	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	16:55:45	1509	22,1	54,9	12,6	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:05:45	1684	22,2	55,2	12,8	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:15:45	1606	22,3	54,9	12,8	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:25:45	1653	22,4	54,8	12,9	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:35:45	1791	22,6	55,2	13,2	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:45:45	1905	22,7	55,4	13,3	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	17:55:45	1951	22,8	55,5	13,4	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	18:05:45	1733	22,8	54,7	13,2	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	18:15:45	1098	22,6	51,8	12,2	Desocupado
11/12/2018	18:25:45	742	22,3	50,5	11,5	Desocupado
11/12/2018	18:35:45	715	22,2	50,6	11,5	Desocupado
11/12/2018	18:45:45	673	21,8	50,6	11,1	Desocupado
11/12/2018	18:55:45	700	21,8	51,1	11,2	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:05:45	670	21,7	51,1	11,2	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:15:45	738	21,9	51,4	11,4	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:25:45	761	22	51,1	11,4	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:35:45	772	21,9	51	11,3	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:45:45	787	22,2	50,9	11,6	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	19:55:45	781	22,3	50,2	11,4	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	20:05:45	768	22,3	49,5	11,2	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	20:15:45	759	22,4	49,5	11,3	Ocupado (22 alumnos) _ 3 ventanas abiertas
11/12/2018	20:25:45	770	22,4	49,2	11,2	Ocupado ( 9 alumnos) _ 3 ventanas abiertas

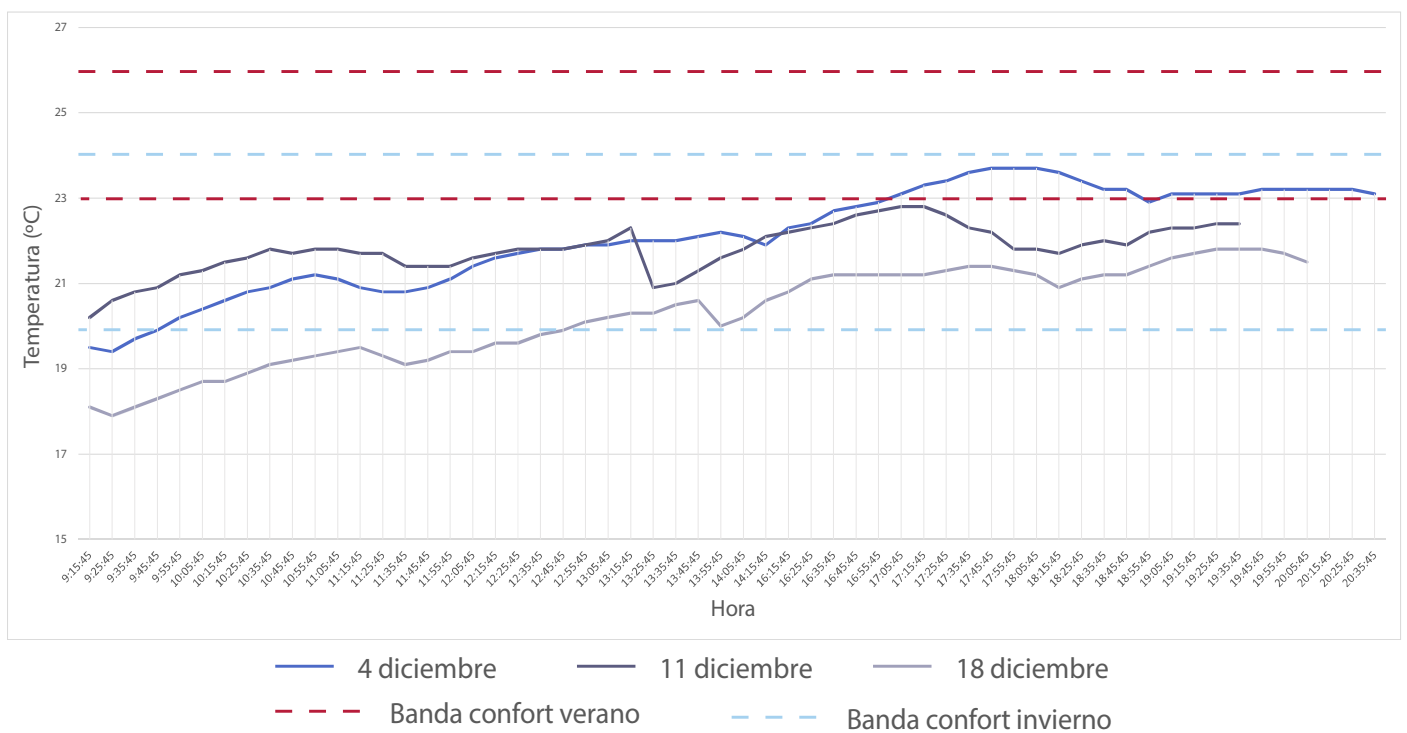
TABLA 10. Datos resultado de las mediciones realizadas en el aula 4.08 el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

Date:	Time:	CO <sub>2</sub> (ppm):	Tª (°C):	R. Humidity (%):	Dew Point (°C):	Observaciones
18/12/2018	9:15:45	521	18,1	44,9	6	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	9:25:45	567	17,9	46,5	6,3	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	9:35:45	691	18,1	47,8	6,9	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	9:45:45	736	18,3	48,1	7,1	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	9:55:45	756	18,5	48	7,3	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:05:45	775	18,7	47,6	7,4	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:15:45	764	18,7	47,3	7,3	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:25:45	786	18,9	47,2	7,4	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:35:45	804	19,1	47,1	7,6	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:45:45	818	19,2	47	7,6	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	10:55:45	827	19,3	46,8	7,7	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	11:05:45	892	19,4	47	7,8	Desocupado
18/12/2018	11:15:45	838	19,5	46,4	7,7	Desocupado
18/12/2018	11:25:45	686	19,3	45,4	7,2	Desocupado
18/12/2018	11:35:45	610	19,1	45,3	7	Desocupado
18/12/2018	11:45:45	631	19,2	45,5	7,2	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	11:55:45	808	19,4	46,5	7,7	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:05:45	880	19,4	47,1	7,8	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:15:45	905	19,6	47,3	8,1	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:25:45	932	19,6	47,3	8,1	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:35:45	1010	19,8	47,6	8,4	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:45:45	1033	19,9	47,7	8,5	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	12:55:45	1058	20,1	47,8	8,7	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	13:05:45	1110	20,2	48	8,8	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	13:15:45	1106	20,3	48	8,9	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	13:25:45	1141	20,3	48	8,9	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	13:35:45	1130	20,5	48,1	9,2	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	13:45:45	1218	20,6	48,3	9,3	Ocupado (10 alumnos) _ ventanas cerradas
18/12/2018	16:15:45	816	20	47,5	8,5	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	16:25:45	1026	20,2	49,1	9,2	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	16:35:45	1119	20,6	50,2	9,9	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	16:45:45	1271	20,8	50,9	10,3	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	16:55:45	1456	21,1	52,1	10,9	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:05:45	1543	21,2	52,6	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:15:45	1543	21,2	52,5	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:25:45	1531	21,2	52,5	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:35:45	1470	21,2	52,3	11	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:45:45	1419	21,2	52,4	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	17:55:45	1325	21,3	52,2	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	18:05:45	1259	21,4	51,8	11,1	Ocupado (20 alumnos)
18/12/2018	18:15:45	1114	21,4	50,7	10,8	Desocupado
18/12/2018	18:25:45	1090	21,3	50,7	10,7	Desocupado
18/12/2018	18:35:45	1029	21,2	50,6	10,5	Desocupado
18/12/2018	18:45:45	1039	20,9	51,2	10,5	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	18:55:45	1076	21,1	51,4	10,7	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:05:45	1223	21,2	52,2	11	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:15:45	1353	21,2	53	11,2	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:25:45	1521	21,4	53,8	11,7	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:35:45	1663	21,6	54,3	12	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:45:45	1771	21,7	54,8	12,2	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	19:55:45	1857	21,8	55,1	12,4	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	20:05:45	1789	21,8	54,8	12,3	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	20:15:45	1717	21,8	54,4	12,2	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	20:25:45	1528	21,7	53,6	11,9	Ocupado (19 alumnos)
18/12/2018	20:35:45	1246	21,5	52,6	11,4	Ocupado (19 alumnos)

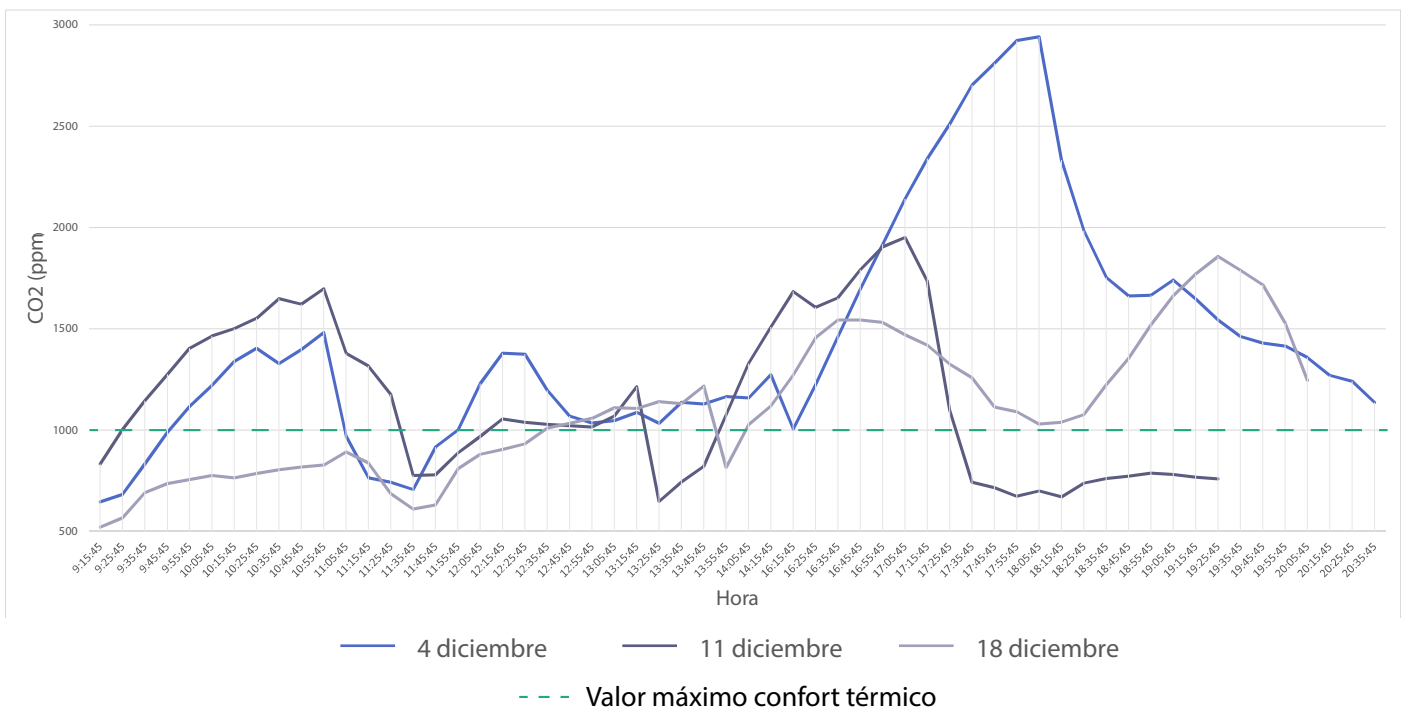
TABLA 11. Datos resultado de las mediciones realizadas en el aula 4.08 el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 21. Gráfica obtenida a partir de los datos de la medición de las humedades relativas del aula los días 4, 11 y 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



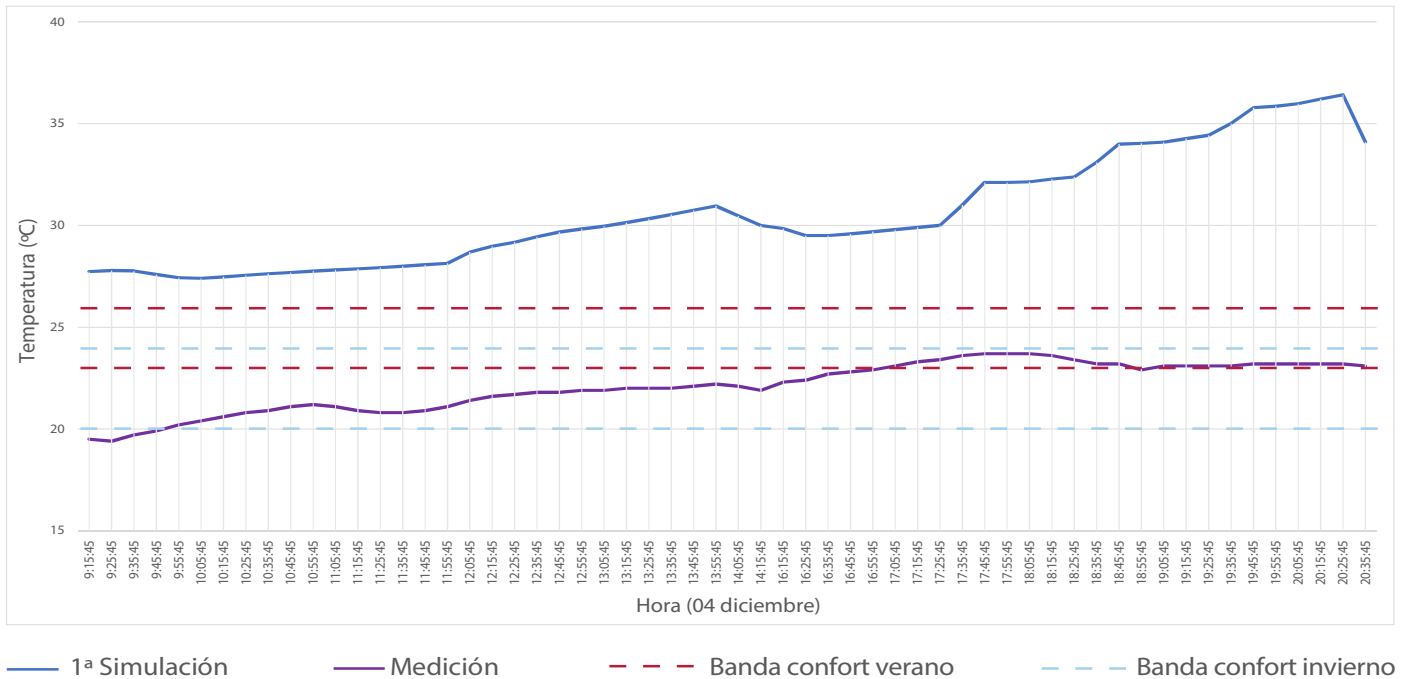
GRÁFICA 22. Gráfica obtenida a partir de los datos de la medición de las temperaturas del aula los días 4, 11 y 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



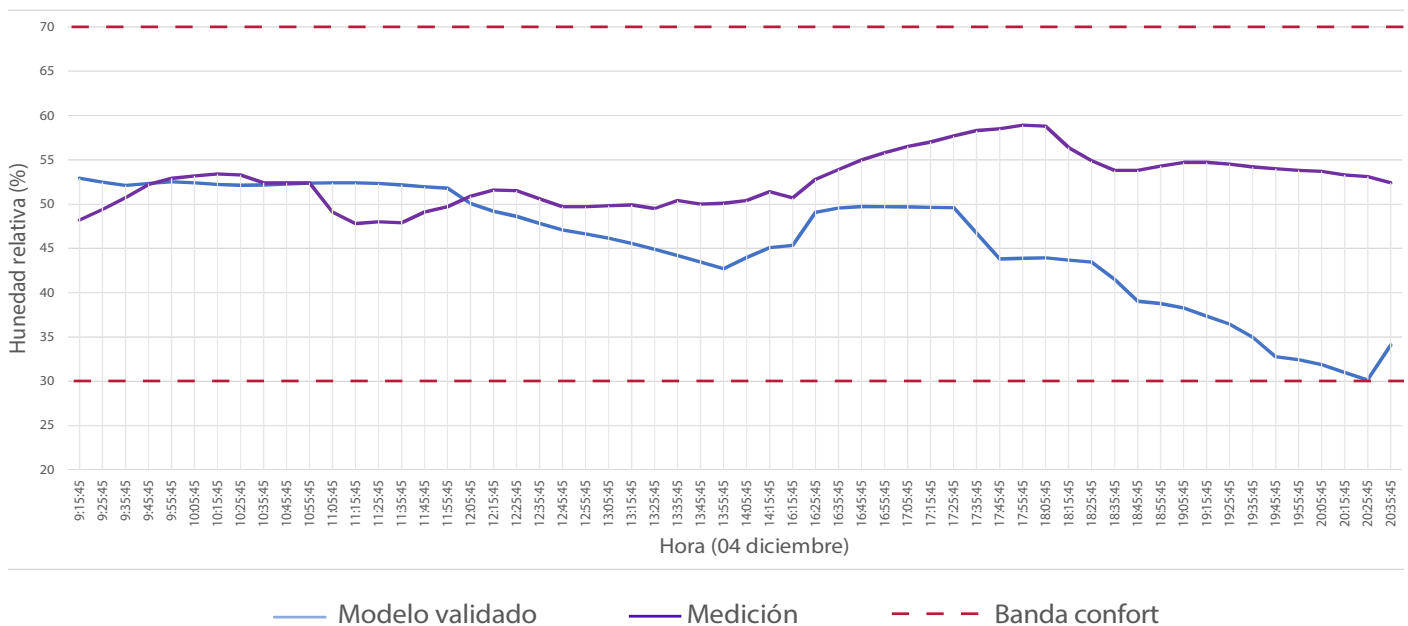
GRÁFICA 23. Gráfica obtenida a partir de los datos de la medición de las cantidades de CO<sub>2</sub> del aula los días 4, 11 y 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



## Primera simulación



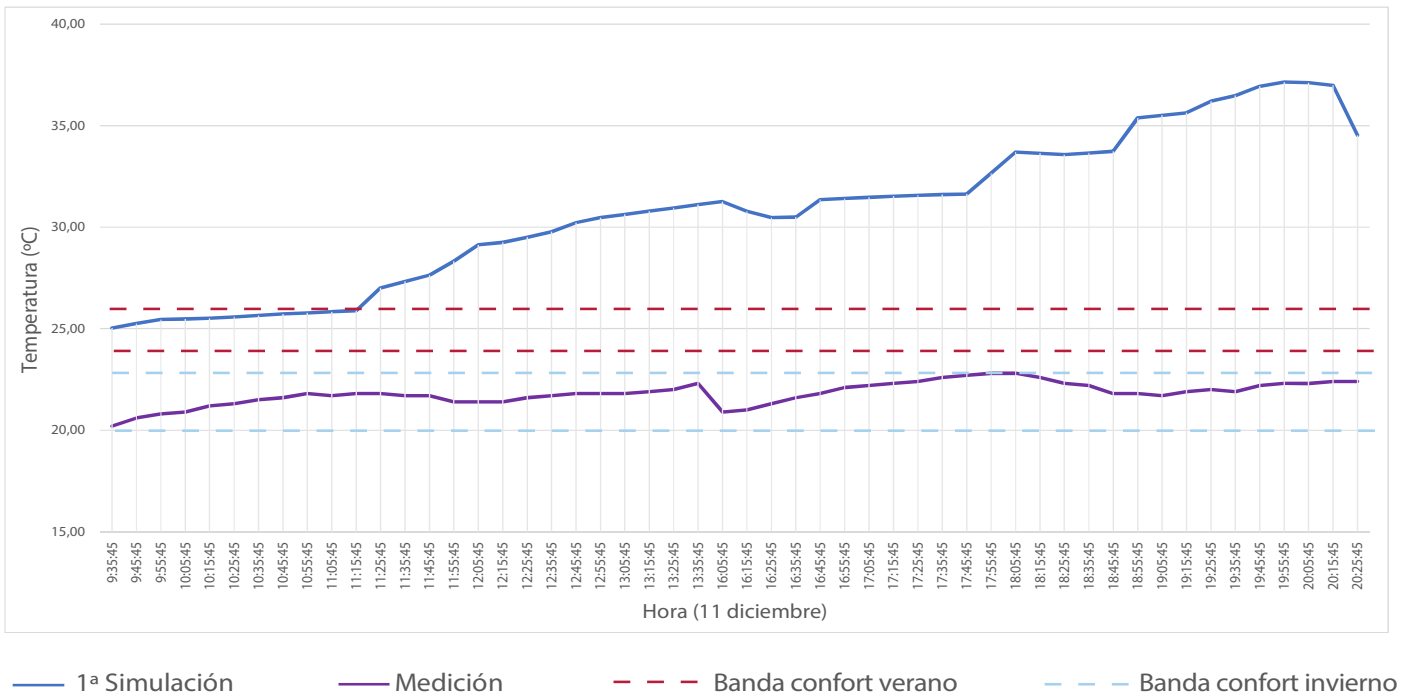
GRÁFICA 24. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



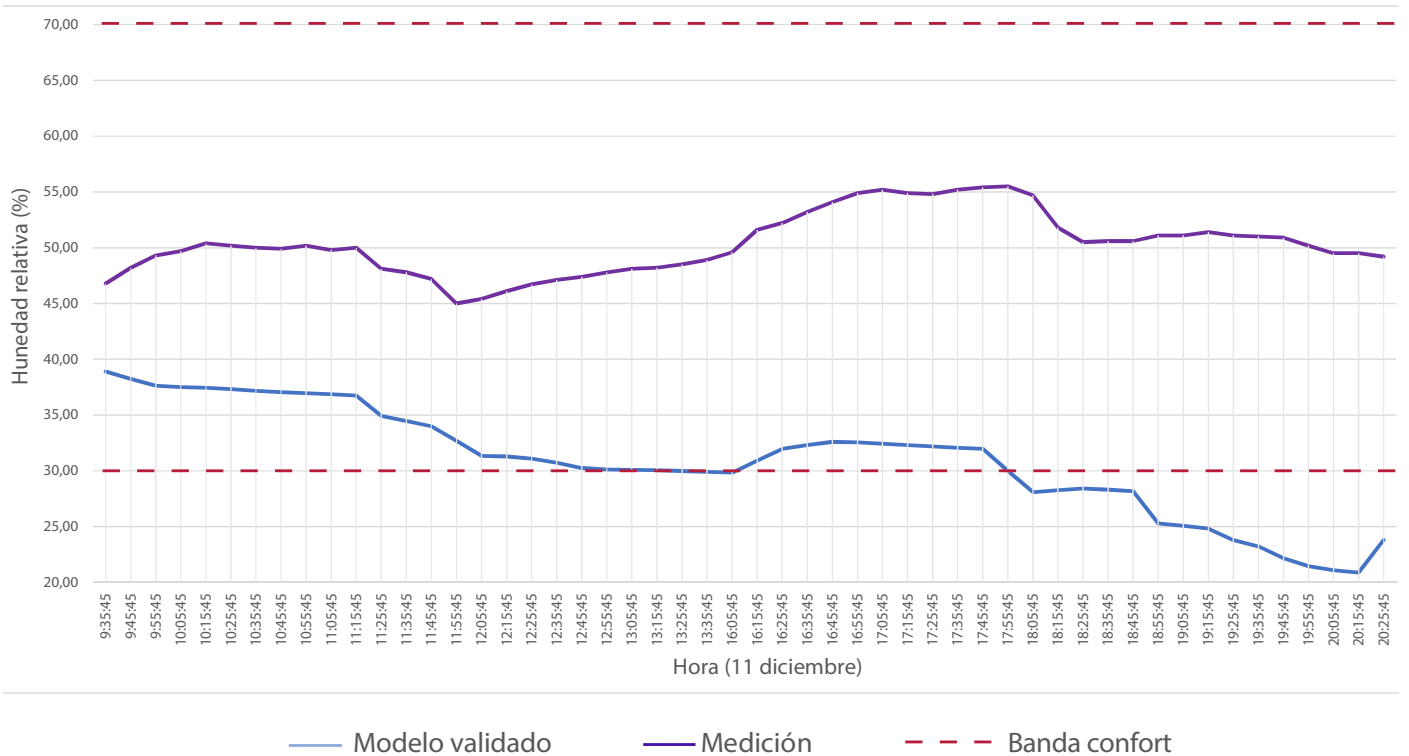
GRÁFICA 25. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

Fecha/Hora	Humedad Relativa (%)	Temperatura del Aire (°C)
04/12/2002 9:00	45,38011	30,20146
04/12/2002 9:10	49,16479	28,9487
04/12/2002 9:20	52,91944	27,73455
04/12/2002 9:30	52,47264	27,78232
04/12/2002 9:40	52,11261	27,7684
04/12/2002 9:50	52,3312	27,58458
04/12/2002 10:00	52,50842	27,4255
04/12/2002 10:10	52,41347	27,40445
04/12/2002 10:20	52,22323	27,47281
04/12/2002 10:30	52,13321	27,55587
04/12/2002 10:40	52,16849	27,62667
04/12/2002 10:50	52,26429	27,69123
04/12/2002 11:00	52,36609	27,75895
04/12/2002 11:10	52,41781	27,81779
04/12/2002 11:20	52,40282	27,86979
04/12/2002 11:30	52,32277	27,92241
04/12/2002 11:40	52,15909	27,99187
04/12/2002 11:50	51,96391	28,06832
04/12/2002 12:00	51,7914	28,13715
04/12/2002 12:10	50,07447	28,68364
04/12/2002 12:20	49,19675	28,98063
04/12/2002 12:30	48,62125	29,17586
04/12/2002 12:40	47,82113	29,4413
04/12/2002 12:50	47,09898	29,67449
04/12/2002 13:00	46,61615	29,82212
04/12/2002 13:10	46,14589	29,96239
04/12/2002 13:20	45,55888	30,1391
04/12/2002 13:30	44,90083	30,33462
04/12/2002 13:40	44,2064	30,53661
04/12/2002 13:50	43,47482	30,74592
04/12/2002 14:00	42,71581	30,95875
04/12/2002 14:10	43,98382	30,46508
04/12/2002 14:20	45,09583	29,99478
04/12/2002 14:30	45,32431	29,84883
04/12/2002 16:00	49,06448	29,50356
04/12/2002 16:10	49,56179	29,50595
04/12/2002 16:20	49,71736	29,58239
04/12/2002 16:30	49,71203	29,68772
04/12/2002 16:40	49,67441	29,79434
04/12/2002 16:50	49,64252	29,89707
04/12/2002 17:00	49,60478	30,00161
04/12/2002 17:10	46,73664	31,00235
04/12/2002 17:20	43,8055	32,11255
04/12/2002 17:30	43,88429	32,11526
04/12/2002 17:40	43,94092	32,13573
04/12/2002 17:50	43,67453	32,27316
04/12/2002 18:00	43,45802	32,38058
04/12/2002 18:10	41,49845	33,10339
04/12/2002 18:20	39,03519	33,99575
04/12/2002 18:30	38,79007	34,02464
04/12/2002 18:40	38,28281	34,09118
04/12/2002 18:50	37,37557	34,26578
04/12/2002 19:00	36,44005	34,42214
04/12/2002 19:10	34,97324	35,00908
04/12/2002 19:20	32,77532	35,78364
04/12/2002 19:30	32,44709	35,85251
04/12/2002 19:40	31,88864	35,97866
04/12/2002 19:50	31,01735	36,20823
04/12/2002 20:00	30,16269	36,41742
04/12/2002 20:10	34,1067	34,09603
04/12/2002 20:20	36,71906	32,61618
04/12/2002 20:30	38,89367	31,4535

TABLA 12. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> del modelo resultado de la primera simulación del día 4 de diciembre.



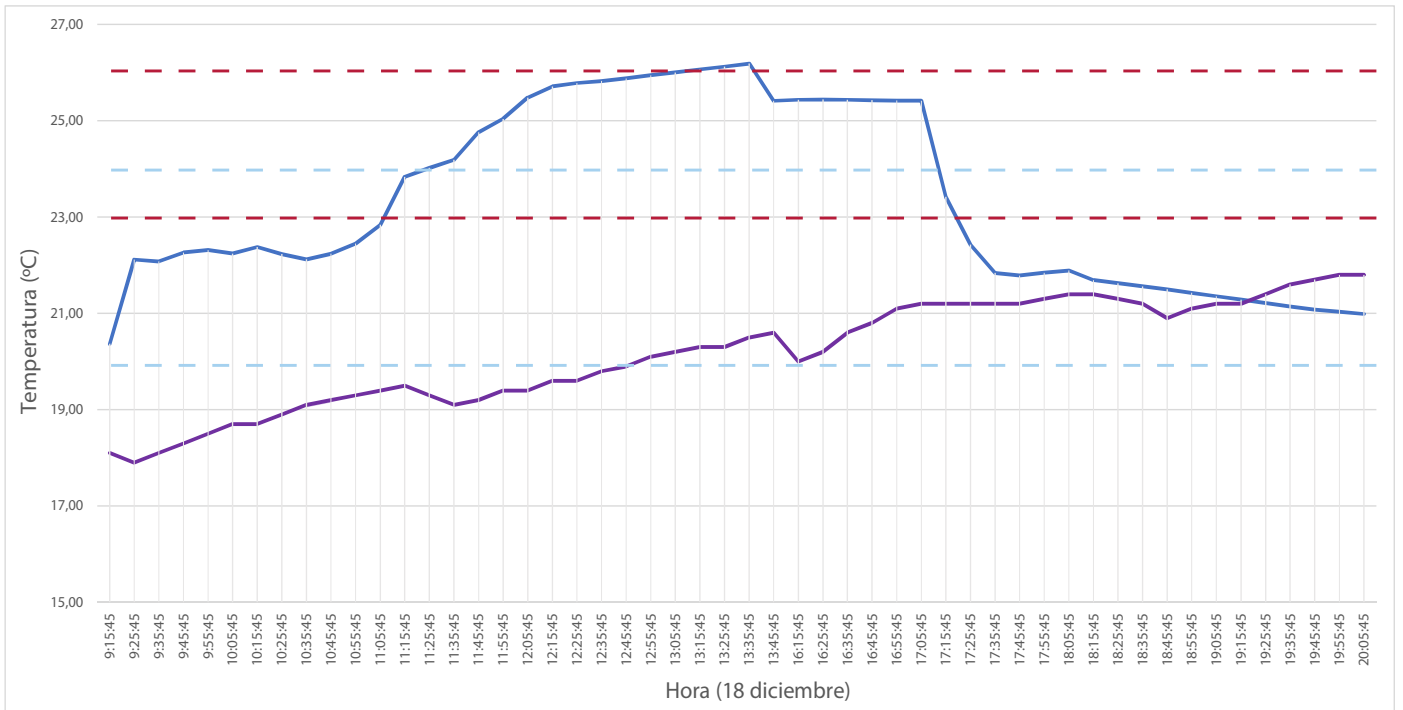
GRÁFICA 26. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 27. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

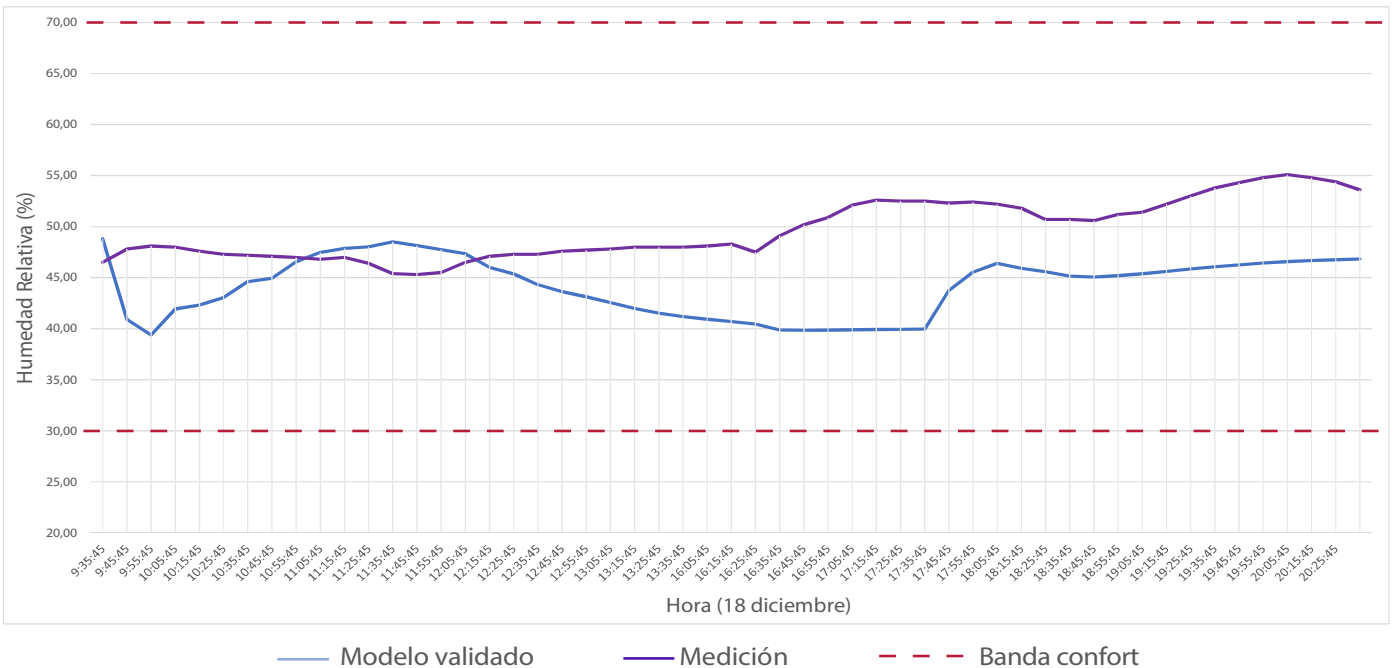
Fecha/Hora	HR (%)	Tª (°C)
11/12/2002 9:00	33,11	27,48
11/12/2002 9:10	36,37	26,08
11/12/2002 9:20	38,91	25,03
11/12/2002 9:30	38,25	25,25
11/12/2002 9:40	37,64	25,45
11/12/2002 9:50	37,53	25,47
11/12/2002 10:00	37,45	25,51
11/12/2002 10:10	37,31	25,58
11/12/2002 10:20	37,17	25,65
11/12/2002 10:30	37,05	25,72
11/12/2002 10:40	36,95	25,78
11/12/2002 10:50	36,86	25,83
11/12/2002 11:00	36,77	25,89
11/12/2002 11:40	34,92	27,01
11/12/2002 11:50	34,48	27,32
11/12/2002 12:00	34,00	27,64
11/12/2002 12:10	32,70	28,31
11/12/2002 12:20	31,35	29,13
11/12/2002 12:30	31,29	29,25
11/12/2002 12:40	31,09	29,50
11/12/2002 12:50	30,72	29,77
11/12/2002 13:00	30,26	30,22
11/12/2002 13:10	30,12	30,47
11/12/2002 13:20	30,10	30,63
11/12/2002 13:30	30,06	30,79
11/12/2002 13:40	29,99	30,95
11/12/2002 13:50	29,91	31,11
11/12/2002 14:00	29,83	31,26
11/12/2002 14:10	30,92	30,79
11/12/2002 14:20	31,97	30,47
11/12/2002 14:30	32,31	30,50
11/12/2002 16:00	32,60	31,36
11/12/2002 16:10	32,54	31,41
11/12/2002 16:20	32,44	31,47
11/12/2002 16:30	32,31	31,52
11/12/2002 16:40	32,19	31,57
11/12/2002 16:50	32,08	31,60
11/12/2002 17:00	31,98	31,63
11/12/2002 17:10	30,00	32,66
11/12/2002 17:20	28,10	33,70
11/12/2002 17:30	28,26	33,63
11/12/2002 17:40	28,42	33,57
11/12/2002 17:50	28,31	33,66
11/12/2002 18:00	28,19	33,73
11/12/2002 18:40	25,30	35,38
11/12/2002 18:50	25,06	35,51
11/12/2002 19:00	24,83	35,62
11/12/2002 19:10	23,80	36,20
11/12/2002 19:20	23,22	36,48
11/12/2002 19:30	22,17	36,94
11/12/2002 19:40	21,46	37,14
11/12/2002 19:50	21,09	37,11
11/12/2002 20:00	20,89	36,99
11/12/2002 20:10	23,81	34,53
11/12/2002 20:20	25,87	32,88
11/12/2002 20:30	27,49	31,66

TABLA 13. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> del modelo resultado de la primera simulación del día 11 de diciembre.



— 1ª Simulación — Medición - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 28 Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la temperatura del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



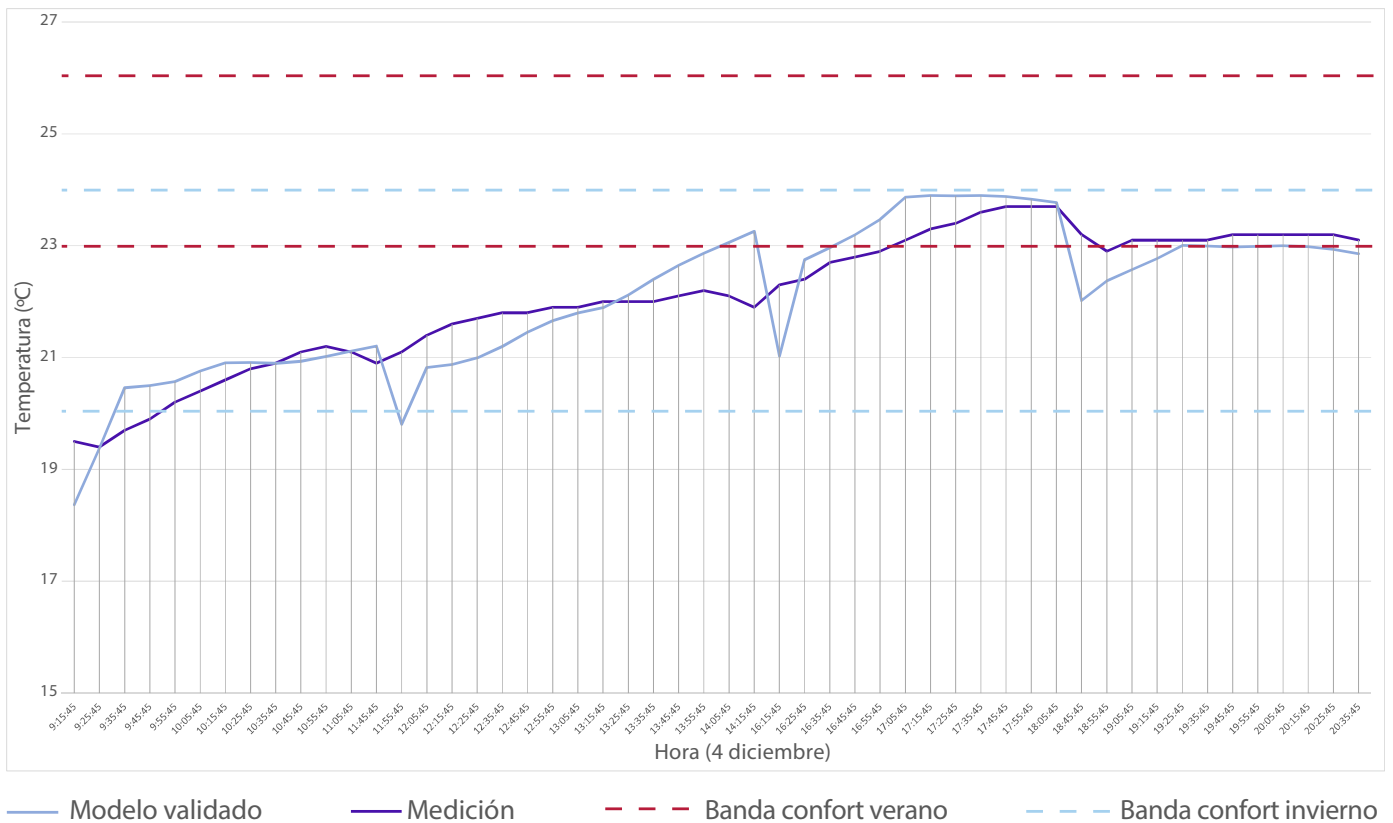
— Modelo validado — Medición - - - Banda confort

GRÁFICA 29. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la primera simulación del modelo en Design Builder comparándolos con los de la medición de la humedad relativa del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

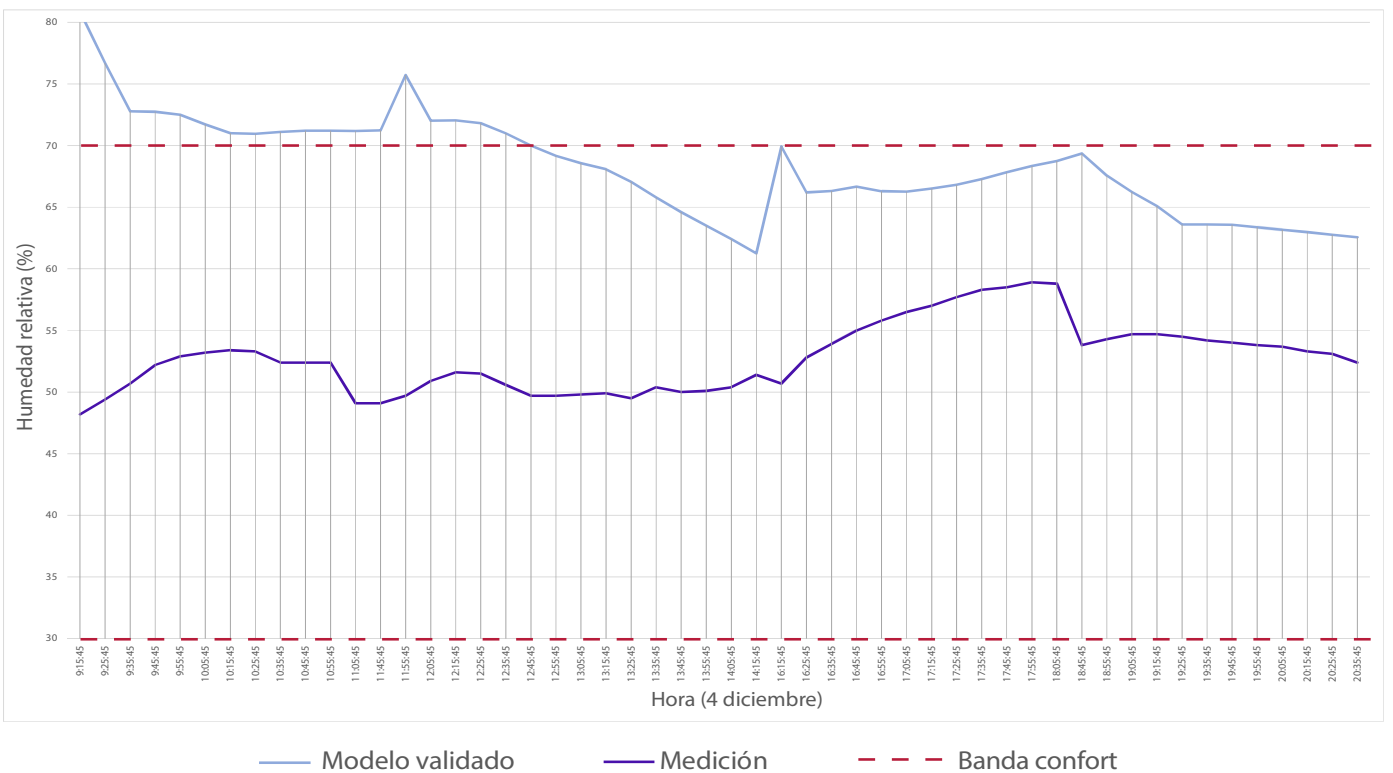
Fecha/Hora	HR (%)	Tª (°C)
18/12/2002 9:00	48,81	16,91
18/12/2002 9:10	40,92	20,37
18/12/2002 9:20	39,39	22,12
18/12/2002 9:30	41,93	22,08
18/12/2002 9:40	42,31	22,26
18/12/2002 9:50	43,04	22,32
18/12/2002 10:00	44,62	22,24
18/12/2002 10:10	44,95	22,38
18/12/2002 10:20	46,55	22,23
18/12/2002 10:30	47,48	22,12
18/12/2002 10:40	47,86	22,24
18/12/2002 10:50	48,01	22,45
18/12/2002 11:00	48,50	22,84
18/12/2002 11:40	48,14	23,83
18/12/2002 11:50	47,74	24,02
18/12/2002 12:00	47,35	24,19
18/12/2002 12:10	46,00	24,76
18/12/2002 12:20	45,38	25,04
18/12/2002 12:30	44,32	25,48
18/12/2002 12:40	43,62	25,71
18/12/2002 12:50	43,12	25,78
18/12/2002 13:00	42,55	25,83
18/12/2002 13:10	41,99	25,88
18/12/2002 13:20	41,54	25,94
18/12/2002 13:30	41,20	26,00
18/12/2002 13:40	40,93	26,06
18/12/2002 13:50	40,69	26,12
18/12/2002 14:00	40,46	26,19
18/12/2002 16:00	39,88	25,42
18/12/2002 16:10	39,84	25,44
18/12/2002 16:20	39,86	25,44
18/12/2002 16:30	39,89	25,43
18/12/2002 16:40	39,92	25,43
18/12/2002 16:50	39,95	25,42
18/12/2002 17:00	39,97	25,41
18/12/2002 17:10	43,77	23,42
18/12/2002 17:20	45,53	22,43
18/12/2002 17:30	46,40	21,84
18/12/2002 17:40	45,92	21,78
18/12/2002 17:50	45,57	21,85
18/12/2002 18:00	45,16	21,89
18/12/2002 18:40	45,07	21,69
18/12/2002 18:50	45,20	21,62
18/12/2002 19:00	45,39	21,56
18/12/2002 19:10	45,62	21,50
18/12/2002 19:20	45,85	21,43
18/12/2002 19:30	46,07	21,36
18/12/2002 19:40	46,26	21,28
18/12/2002 19:50	46,43	21,21
18/12/2002 20:00	46,57	21,14
18/12/2002 20:10	46,68	21,08
18/12/2002 20:20	46,76	21,03
18/12/2002 20:30	46,82	20,99

TABLA 14. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> del modelo resultado de la primera simulación del día 18 de diciembre.

## Modelo validado



GRÁFICA 30. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

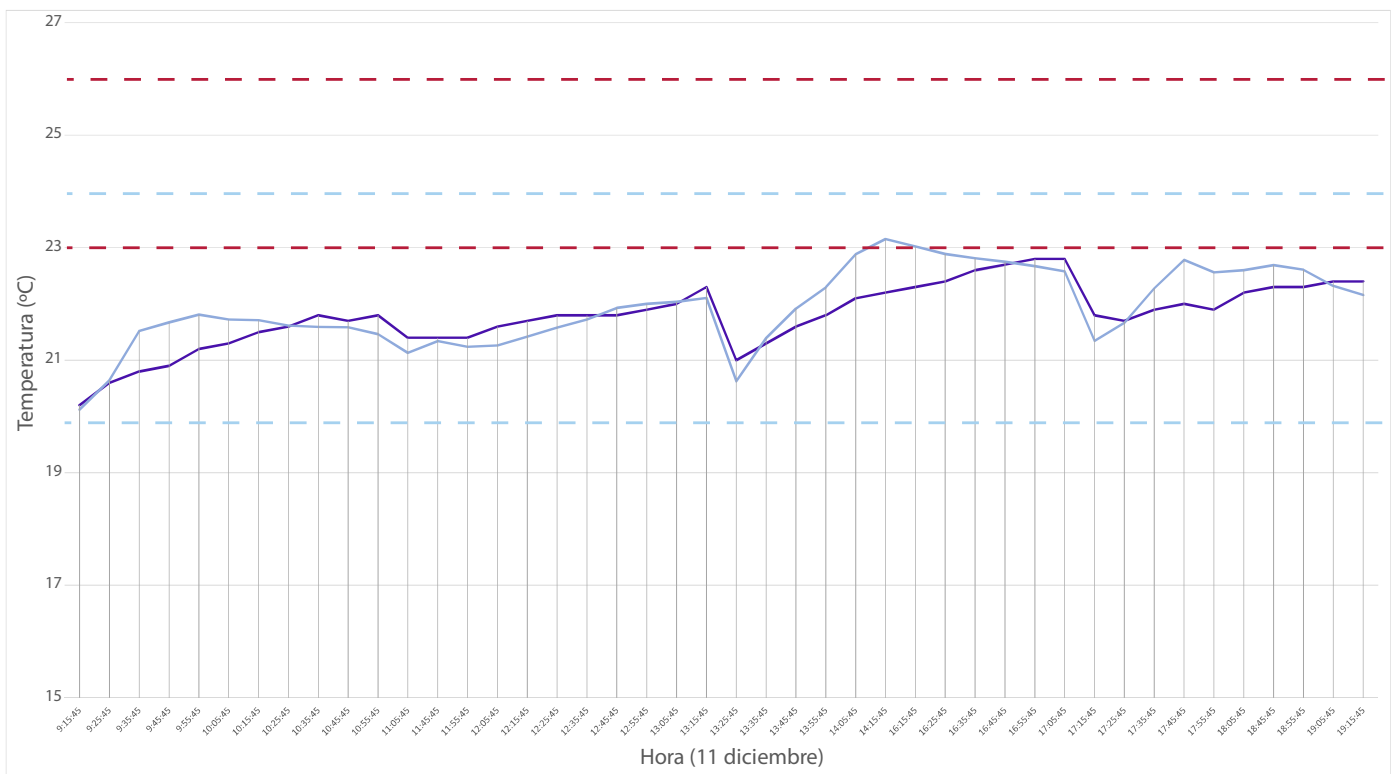


GRÁFICA 31. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la humedad relativa del aula el día 4 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.



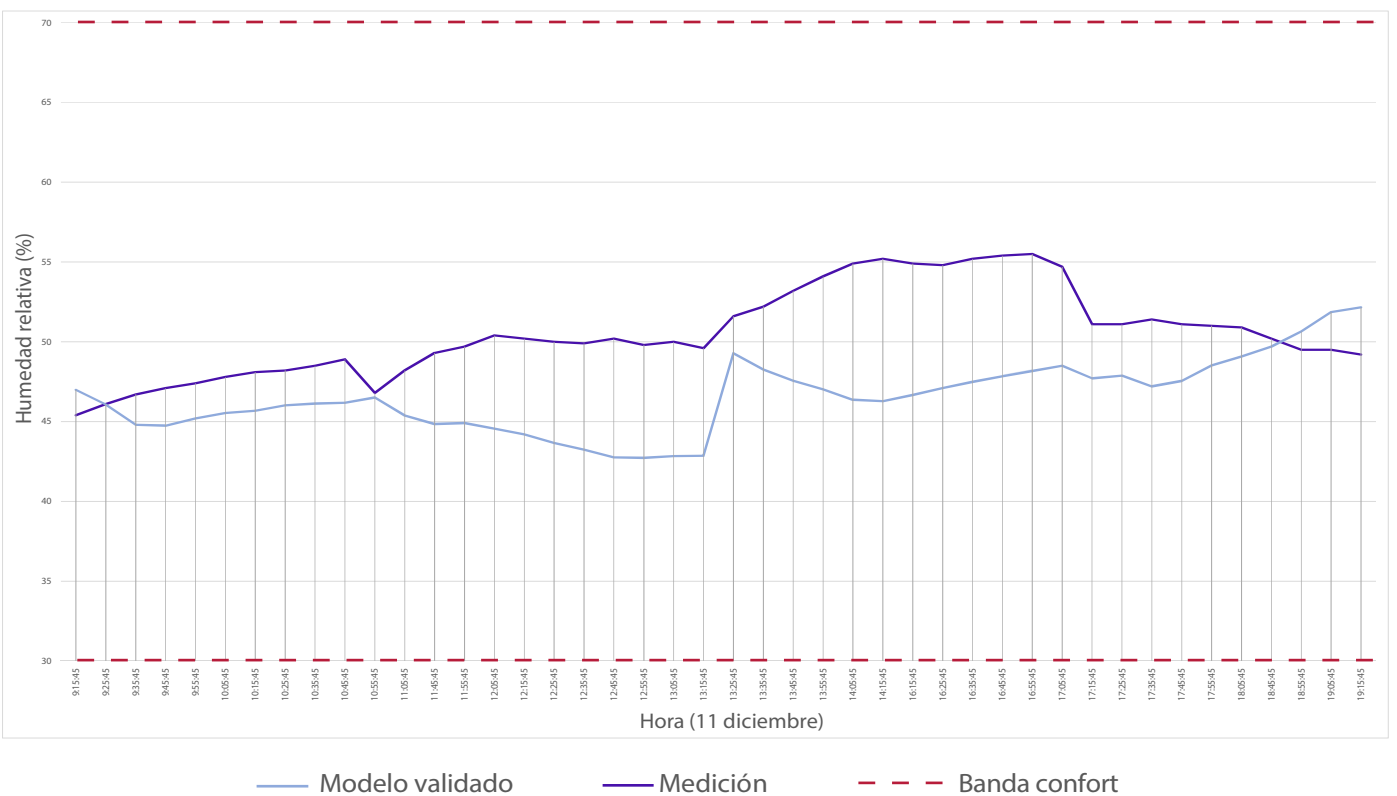
Fecha/Hora	HR (%)	Tª (°C)	CO <sub>2</sub> (kg)
04/12/2002 9:00	80,86	18,37	9,46
04/12/2002 9:10	76,69	19,38	12,64
04/12/2002 9:20	72,78	20,46	12,64
04/12/2002 9:30	72,75	20,50	12,64
04/12/2002 9:40	72,50	20,57	12,64
04/12/2002 9:50	71,72	20,76	12,64
04/12/2002 10:00	71,00	20,91	12,64
04/12/2002 10:10	70,95	20,91	12,65
04/12/2002 10:20	71,12	20,90	12,65
04/12/2002 10:30	71,21	20,93	12,65
04/12/2002 10:40	71,21	21,02	12,65
04/12/2002 10:50	71,20	21,11	12,65
04/12/2002 11:00	71,22	21,21	12,65
04/12/2002 11:40	75,74	19,81	12,48
04/12/2002 11:50	72,01	20,82	12,48
04/12/2002 12:00	72,04	20,88	12,48
04/12/2002 12:10	71,81	20,99	12,30
04/12/2002 12:20	71,00	21,20	12,30
04/12/2002 12:30	70,00	21,45	12,30
04/12/2002 12:40	69,17	21,66	12,30
04/12/2002 12:50	68,58	21,80	12,30
04/12/2002 13:00	68,09	21,89	12,30
04/12/2002 13:10	67,07	22,12	12,29
04/12/2002 13:20	65,80	22,40	12,29
04/12/2002 13:30	64,60	22,65	12,29
04/12/2002 13:40	63,51	22,86	12,29
04/12/2002 13:50	62,41	23,06	12,29
04/12/2002 14:00	61,26	23,26	12,29
04/12/2002 16:10	69,94	21,03	8,25
04/12/2002 16:20	66,21	22,75	8,25
04/12/2002 16:30	66,33	22,96	8,25
04/12/2002 16:40	66,67	23,19	8,25
04/12/2002 16:50	66,30	23,47	13,06
04/12/2002 17:00	66,27	23,87	13,06
04/12/2002 17:10	66,53	23,90	13,06
04/12/2002 17:20	66,82	23,89	13,06
04/12/2002 17:30	67,29	23,90	13,06
04/12/2002 17:40	67,83	23,88	13,06
04/12/2002 17:50	68,34	23,83	13,24
04/12/2002 18:00	68,75	23,77	13,24
04/12/2002 18:40	69,37	22,02	13,24
04/12/2002 18:50	67,56	22,37	13,24
04/12/2002 19:00	66,24	22,57	13,24
04/12/2002 19:10	65,10	22,77	13,24
04/12/2002 19:20	63,60	23,01	13,36
04/12/2002 19:30	63,60	22,99	13,36
04/12/2002 19:40	63,58	22,98	13,36
04/12/2002 19:50	63,37	22,99	13,36
04/12/2002 20:00	63,18	23,00	13,36
04/12/2002 20:10	62,98	22,98	13,36
04/12/2002 20:20	62,78	22,93	13,36
04/12/2002 20:30	62,56	22,86	13,36

TABLA 15. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> resultado de la simulación del modelo validado el día 4 de diciembre. Datos de horas ocupadas.



— Modelo validado — Medición — — Banda confort verano — — Banda confort invierno

GRÁFICA 32. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

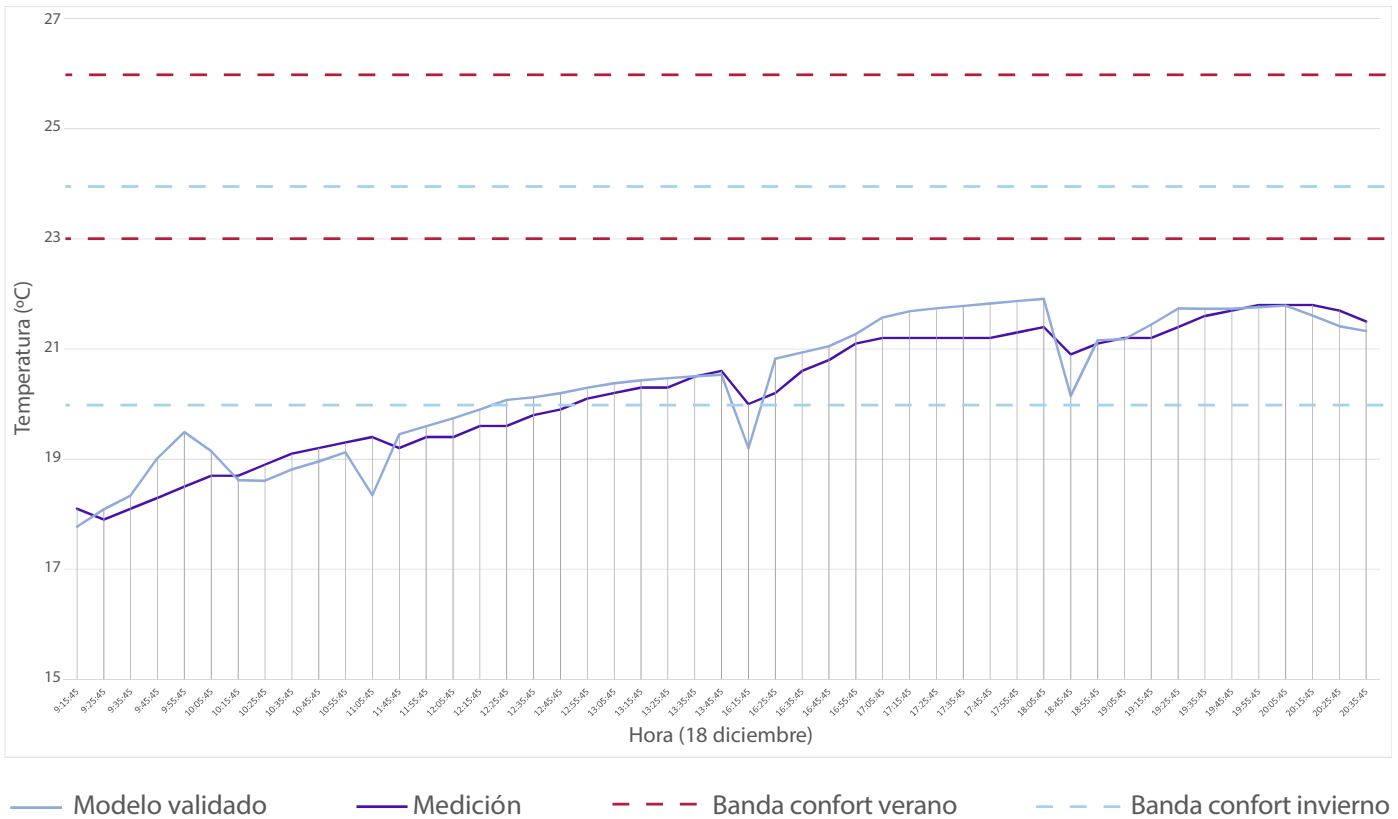


— Modelo validado — Medición — — Banda confort

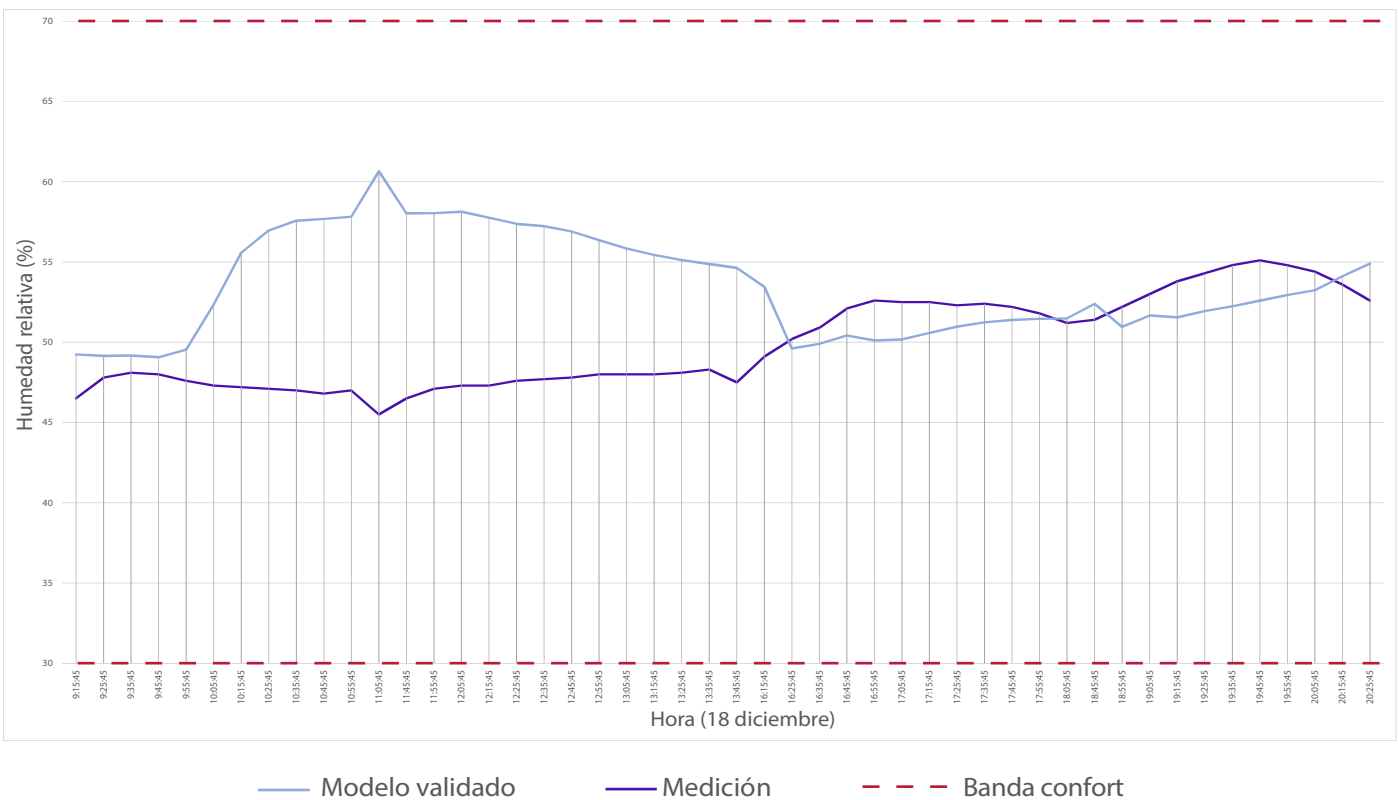
GRÁFICA 33. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la humedad relativa del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

Fecha/Hora	HR (%)	T <sup>a</sup> (°C)	CO <sub>2</sub>
11/12/2002 9:30	46,99	20,12	13,62
11/12/2002 9:40	46,07	20,64	13,48
11/12/2002 9:50	44,80	21,52	13,48
11/12/2002 10:00	44,74	21,67	13,48
11/12/2002 10:10	45,20	21,81	13,03
11/12/2002 10:20	45,54	21,72	13,03
11/12/2002 10:30	45,67	21,71	13,03
11/12/2002 10:40	46,01	21,62	13,03
11/12/2002 10:50	46,13	21,59	13,03
11/12/2002 11:00	46,19	21,59	13,03
11/12/2002 11:10	46,51	21,46	12,54
11/12/2002 11:50	45,38	21,13	13,03
11/12/2002 12:00	44,85	21,34	13,03
11/12/2002 12:10	44,91	21,24	13,03
11/12/2002 12:20	44,57	21,26	13,03
11/12/2002 12:30	44,20	21,42	13,03
11/12/2002 12:40	43,66	21,58	13,37
11/12/2002 12:50	43,23	21,72	13,37
11/12/2002 13:00	42,76	21,93	13,37
11/12/2002 13:10	42,73	22,00	12,63
11/12/2002 13:20	42,84	22,04	12,63
11/12/2002 13:30	42,86	22,11	12,63
11/12/2002 16:10	49,28	20,63	11,00
11/12/2002 16:20	48,26	21,40	11,00
11/12/2002 16:30	47,57	21,92	11,00
11/12/2002 16:40	47,02	22,30	11,35
11/12/2002 16:50	46,37	22,88	11,35
11/12/2002 17:00	46,28	23,15	11,35
11/12/2002 17:10	46,67	23,02	11,35
11/12/2002 17:20	47,11	22,89	11,35
11/12/2002 17:30	47,49	22,81	11,35
11/12/2002 17:40	47,83	22,75	11,35
11/12/2002 17:50	48,17	22,67	11,35
11/12/2002 18:00	48,50	22,58	11,35
11/12/2002 18:50	47,71	21,35	12,01
11/12/2002 19:00	47,88	21,66	12,01
11/12/2002 19:10	47,21	22,28	13,20
11/12/2002 19:20	47,55	22,78	13,20
11/12/2002 19:30	48,52	22,56	13,20
11/12/2002 19:40	49,08	22,60	13,34
11/12/2002 19:50	49,70	22,69	13,34
11/12/2002 20:00	50,65	22,61	13,34
11/12/2002 20:10	51,87	22,32	12,99
11/12/2002 20:20	52,16	22,16	12,99

TABLA 16. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> resultado de la simulación del modelo validado el día 11 de diciembre. Datos de horas ocupadas.



GRÁFICA 34. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la temperatura del aula el día 18 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

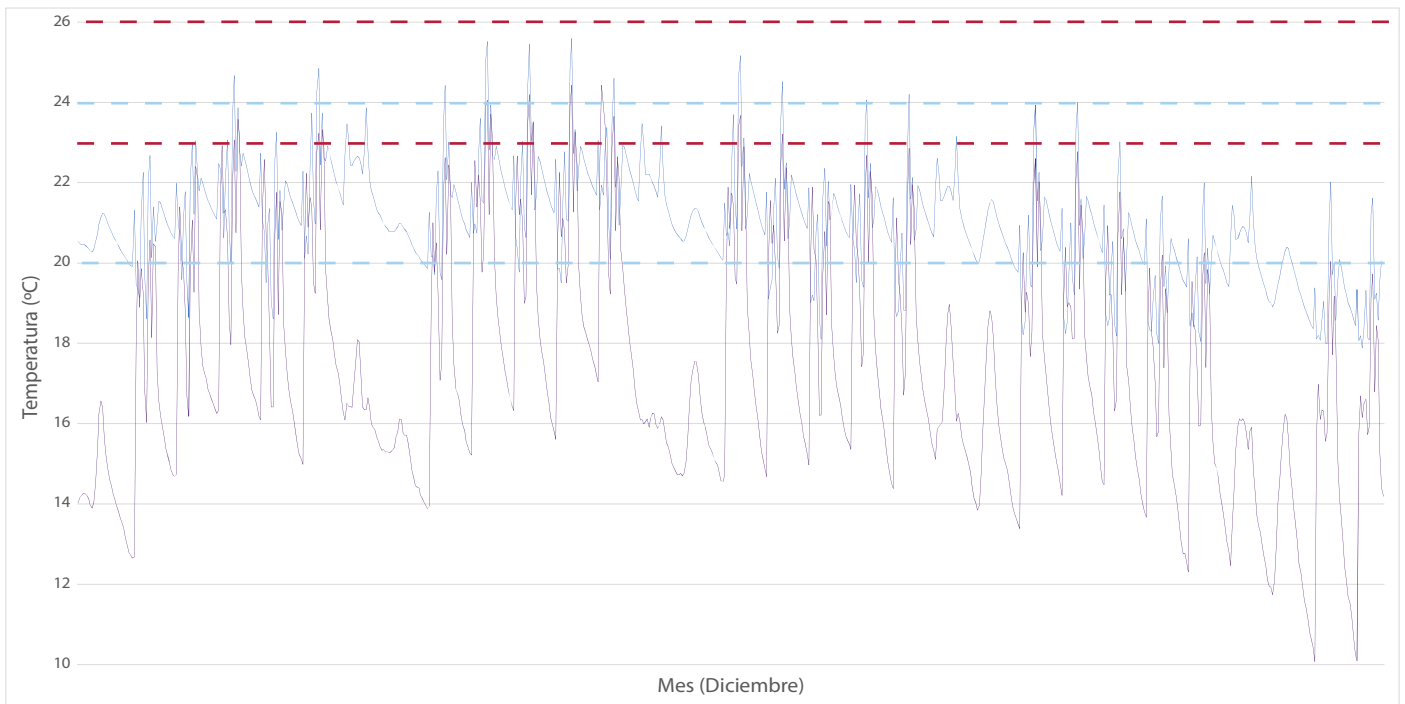


GRÁFICA 35. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo validado en Design Builder comparándolos con los datos de la medición de la humedad relativa del aula el día 11 de diciembre de 2018. Gráfica elaborada por autor.

Fecha/Hora	HR (%)	Tª (°C)	CO <sub>2</sub>
18/12/2002 9:20	49,24	17,77	12,20
18/12/2002 9:30	49,15	18,09	12,20
18/12/2002 9:40	49,17	18,34	12,20
18/12/2002 9:50	49,07	19,02	12,20
18/12/2002 10:00	49,54	19,49	12,20
18/12/2002 10:10	52,35	19,14	11,17
18/12/2002 10:20	55,58	18,62	11,17
18/12/2002 10:30	56,97	18,61	11,17
18/12/2002 10:40	57,58	18,81	11,17
18/12/2002 10:50	57,69	18,96	11,17
18/12/2002 11:00	57,83	19,12	11,17
18/12/2002 11:40	60,66	18,35	11,17
18/12/2002 11:50	58,04	19,45	11,17
18/12/2002 12:00	58,04	19,59	11,17
18/12/2002 12:10	58,13	19,74	11,17
18/12/2002 12:20	57,76	19,90	11,17
18/12/2002 12:30	57,38	20,08	11,17
18/12/2002 12:40	57,23	20,12	11,17
18/12/2002 12:50	56,90	20,20	11,17
18/12/2002 13:00	56,36	20,29	11,17
18/12/2002 13:10	55,84	20,38	11,17
18/12/2002 13:20	55,44	20,43	11,17
18/12/2002 13:30	55,13	20,47	11,17
18/12/2002 13:40	54,88	20,50	11,17
18/12/2002 13:50	54,64	20,53	11,17
18/12/2002 14:00	54,54	20,55	11,17
18/12/2002 16:00	57,84	17,74	9,68
18/12/2002 16:10	53,46	19,20	12,65
18/12/2002 16:20	49,61	20,82	12,65
18/12/2002 16:30	49,89	20,94	12,65
18/12/2002 16:40	50,42	21,05	12,65
18/12/2002 16:50	50,11	21,27	12,65
18/12/2002 17:00	50,17	21,57	12,65
18/12/2002 17:10	50,58	21,68	12,65
18/12/2002 17:20	50,97	21,74	12,65
18/12/2002 17:30	51,24	21,78	12,65
18/12/2002 17:40	51,39	21,83	12,65
18/12/2002 17:50	51,46	21,87	12,65
18/12/2002 18:00	51,49	21,91	12,65
18/12/2002 18:40	52,39	20,15	12,68
18/12/2002 18:50	50,95	21,16	12,68
18/12/2002 19:00	51,67	21,18	12,68
18/12/2002 19:10	51,55	21,44	13,27
18/12/2002 19:20	51,95	21,74	13,27
18/12/2002 19:30	52,24	21,73	13,27
18/12/2002 19:40	52,59	21,73	13,27
18/12/2002 19:50	52,94	21,76	13,27
18/12/2002 20:00	53,24	21,79	13,27
18/12/2002 20:10	54,11	21,61	12,59
18/12/2002 20:20	54,90	21,41	12,59
18/12/2002 20:30	55,24	21,33	12,59

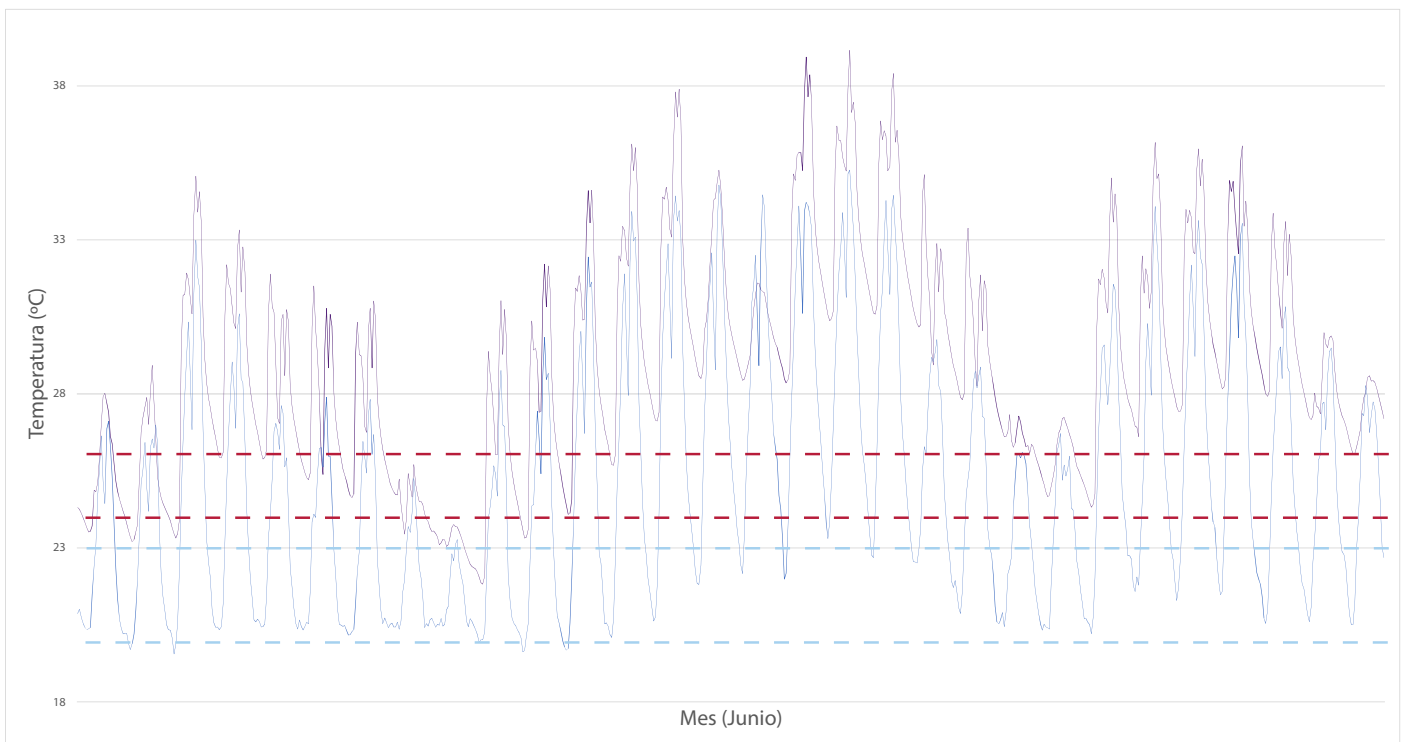
TABLA 17. Tabla de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> resultado de la simulación del modelo validado el día 18 de diciembre. Datos de horas ocupadas.

## Modelo mejorado



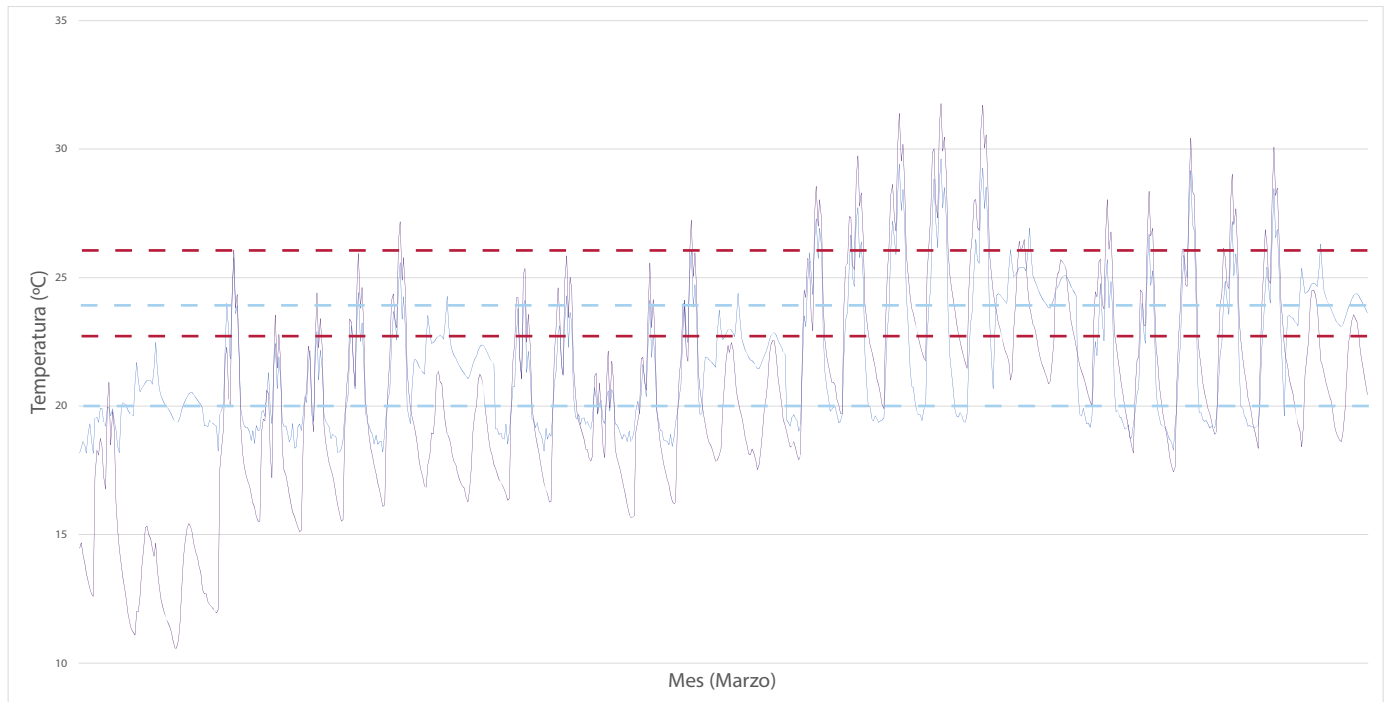
— Modelo mejorado — Caso actual - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 36. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.



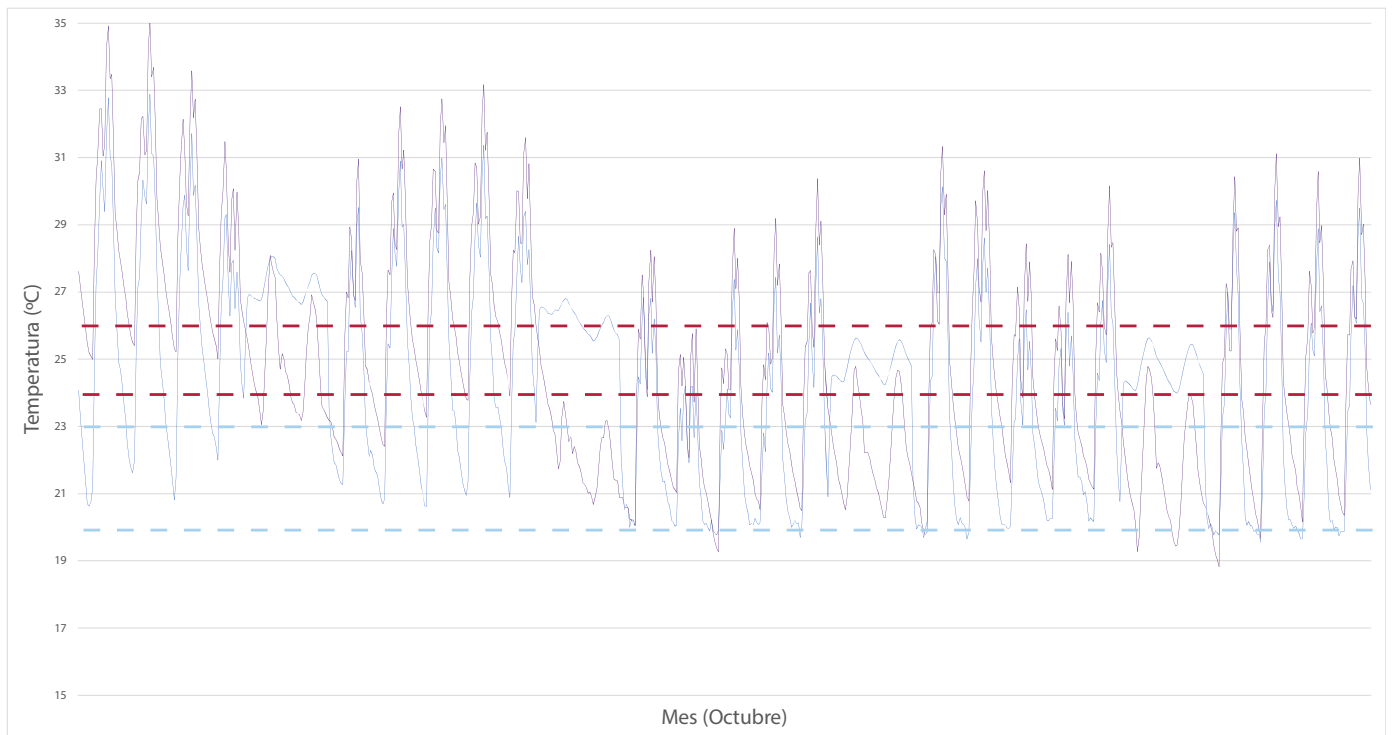
— Modelo mejorado — Caso actual - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 37. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.



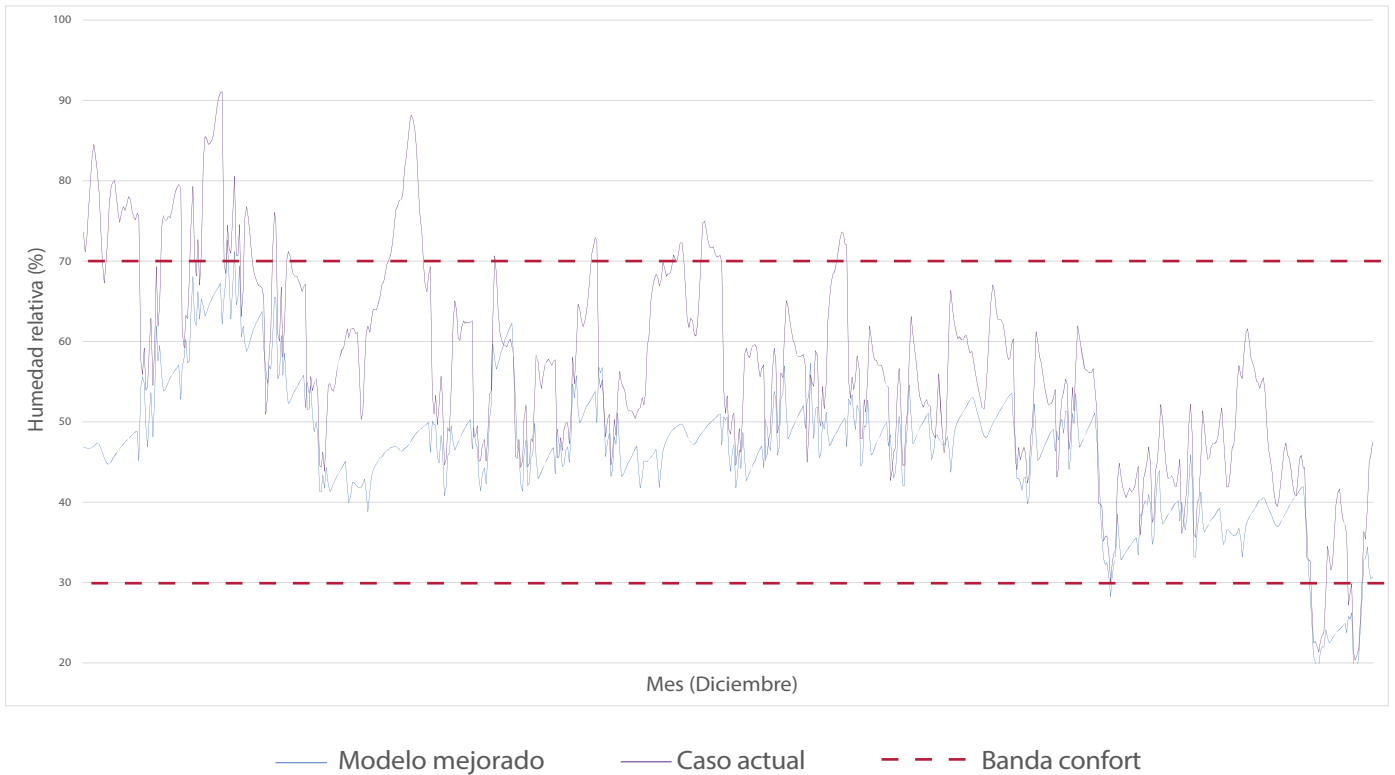
— Modelo mejorado — Caso actual - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 38. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de marzo. Gráfica elaborada por autor.

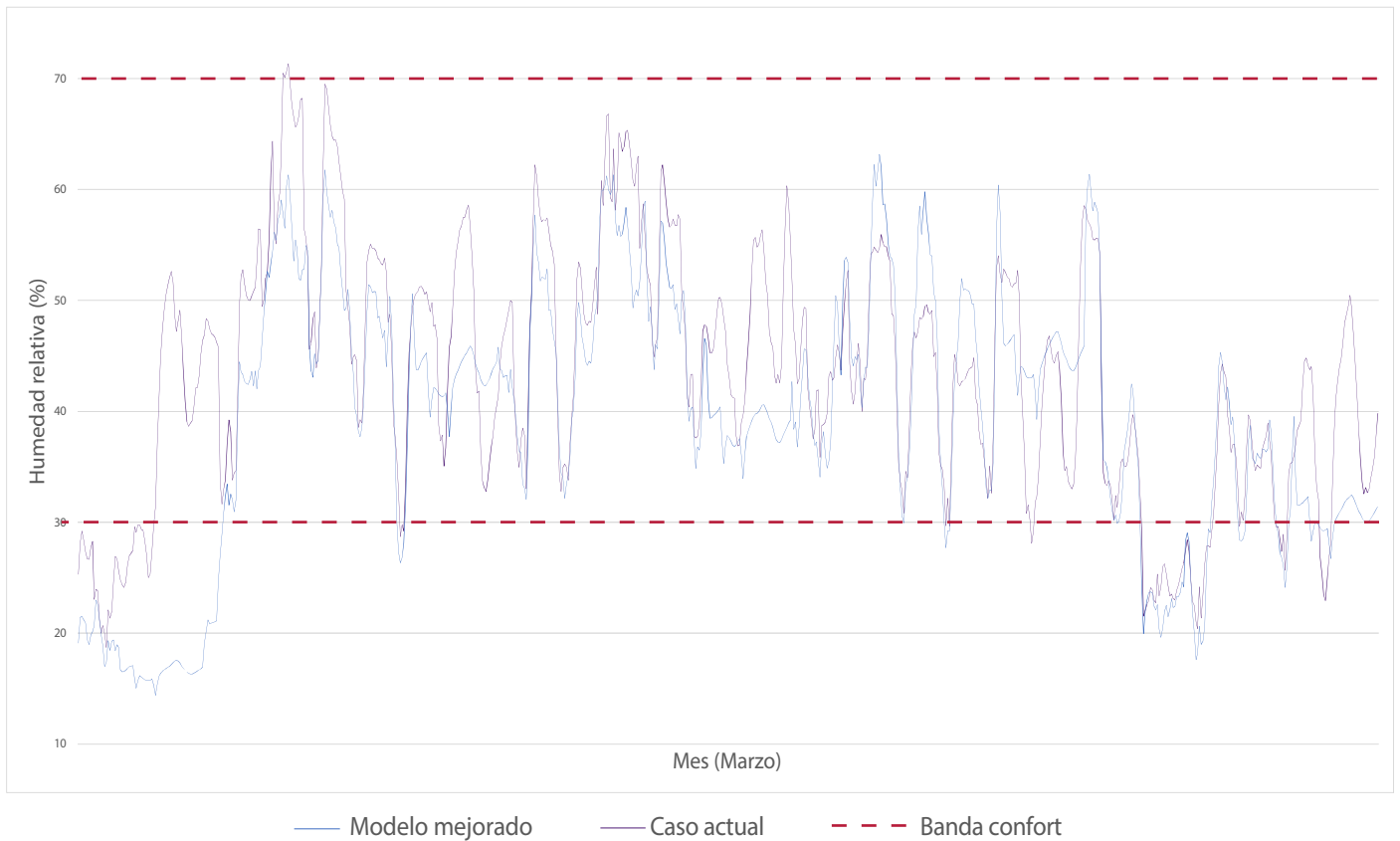


— Modelo mejorado — Caso actual - - - Banda confort verano - - - Banda confort invierno

GRÁFICA 39. Gráfica obtenida a partir de los datos de temperatura obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de octubre. Gráfica elaborada por autor.

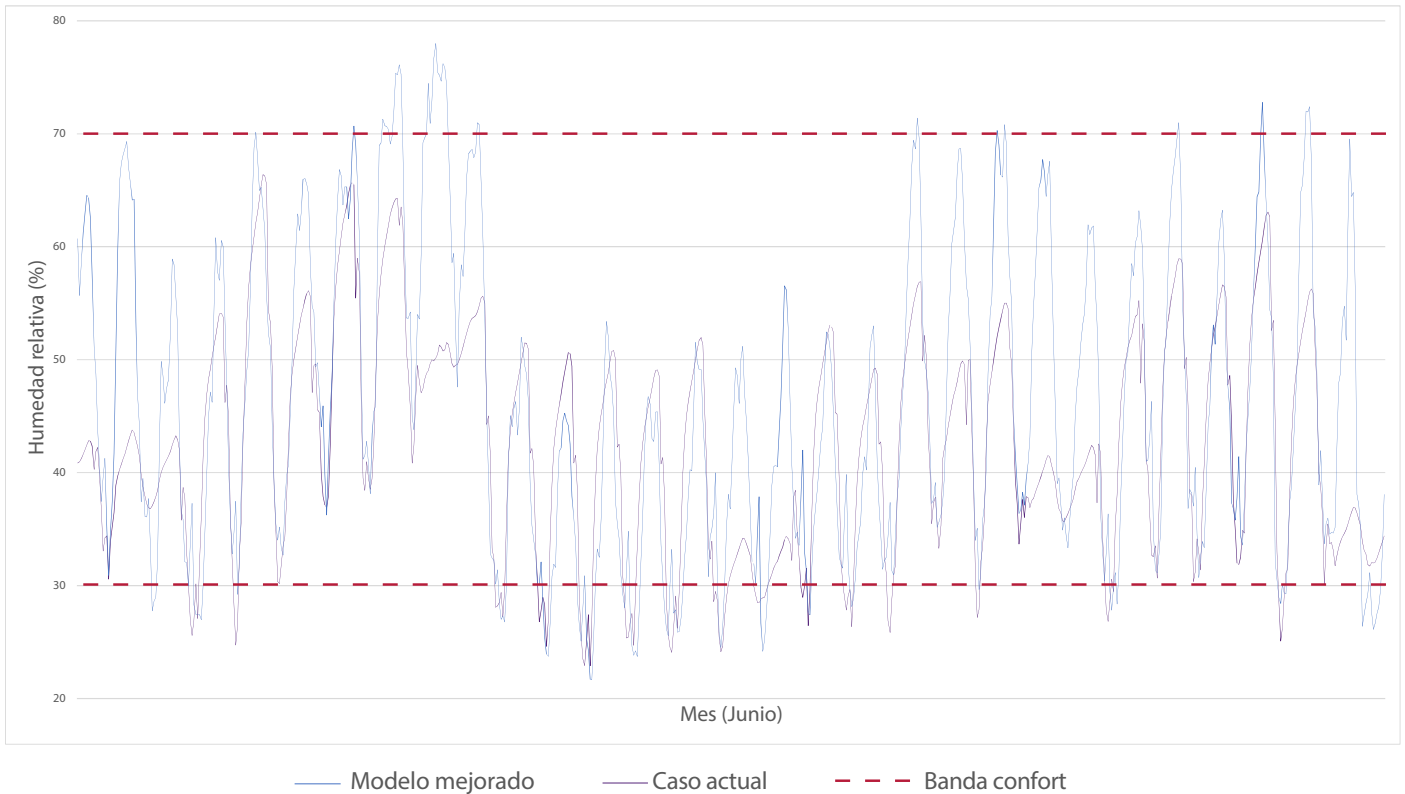


GRÁFICA 40. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de diciembre. Gráfica elaborada por autor.

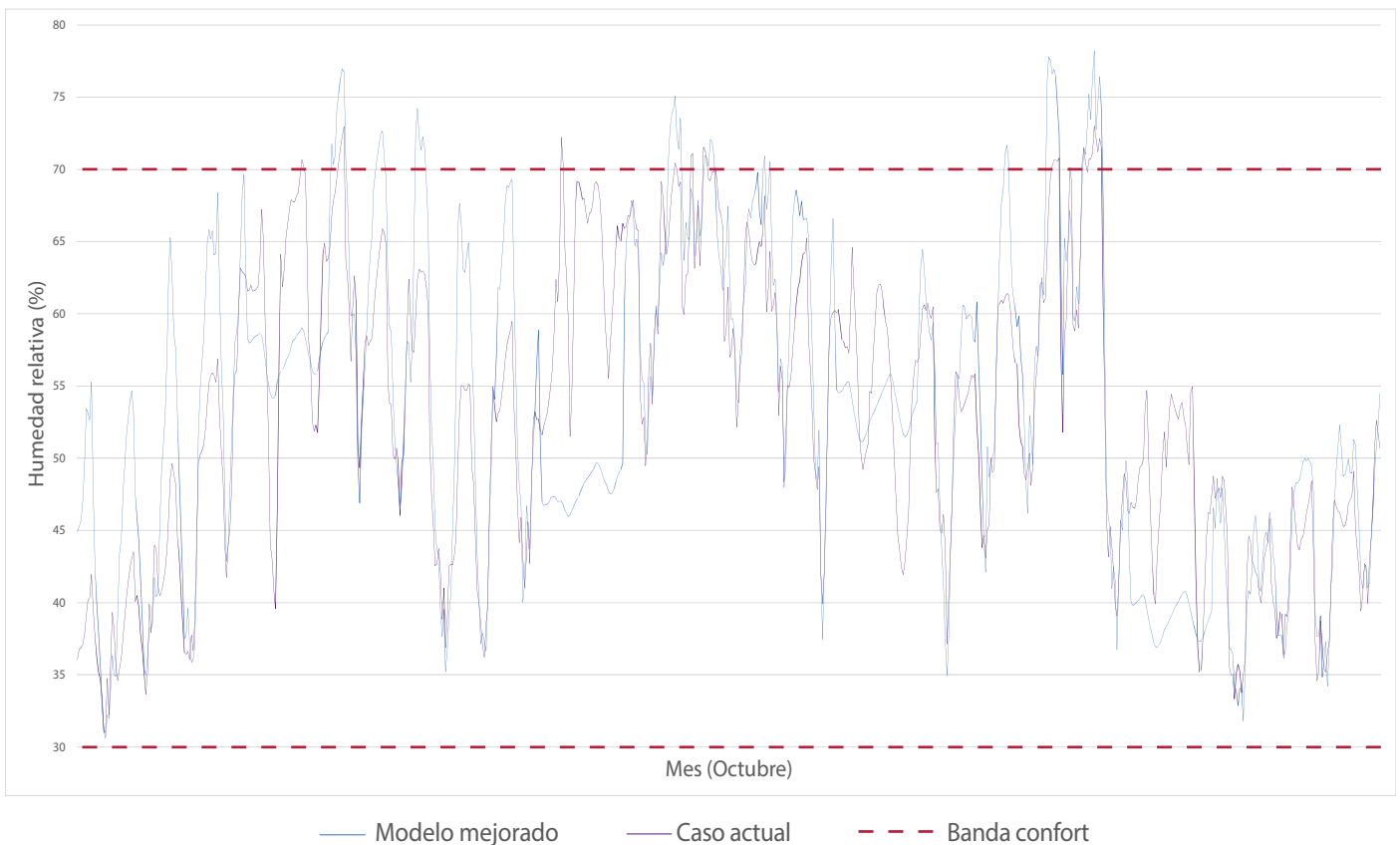


GRÁFICA 41. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de marzo. Gráfica elaborada por autor.





GRÁFICA 42. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de junio. Gráfica elaborada por autor.



GRÁFICA 43. Gráfica obtenida a partir de los datos de humedad relativa obtenidos en la simulación del modelo mejorado en Design Builder comparándolos con los datos de la simulación del modelo validado, es decir, del caso actual durante el mes de octubre. Gráfica elaborada por autor.

## Libros

- *Auliciems, A., Szokolay, S. (1997). Thermal comfort. Notes of passive and low energy architecture international, Australia. Recuperado de: [https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/plea\\_2007\\_thermal\\_comfort.pdf](https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/plea_2007_thermal_comfort.pdf)*
- *Fanger, P Ole (1970). Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill Book Company, United States. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/146642407209200337>*
- *Bjørn Kvisgaard (1997). Thermal Comfort. INNOVA Air Tech Instruments A/S, Denmark, Brüel & Kjær. Traducido por Manuel Martín Monroy (2000). Recuperado de: <https://docplayer.es/19128044-La-comodidad-termica.html>*

## Artículos

- *Arellano, García, Guarachi, Nope, (2015). Análisis de Paramentos Solares activos en Establecimientos de salud.*
- *Armendáriz Perez de Ciriza, P. (2006). Evaluación del bienestar térmico en locales de trabajo cerrados mediante los índices térmicos PMV y PPD.*
- *Hoyos López, Raquel (2014). Guía sobre Gestión de la Demanda Energética del Edificio. Capítulo 1, Demanda energética de la edificación.*
- *Matias, L. (2010). Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal. Universidade técnica de Lisboa (Portugal). Tesis Doctoral.*
- *Melo, Torres, Hernández, Pantoja (2016). Relación entre la capacidad de atención de los estudiantes con el CO<sub>2</sub> en el aula.*
- *Suárez R, Escandón R, López-Pérez R, León-Rodríguez ÁL, Klein T, Silvester S. (2018). Impact of Climate Change: Environmental Assessment of Passive Solutions in a Single-Family Home in Southern Spain. Sustainability, Basel, Switzerland.*

## Normativas

- *BOE núm 97 (1997). Real Decreto 486/1997 por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.*
- *BOE núm 207 (2007). Real Decreto 1027/2007 de 20 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.*
- *Diario Oficial de la Unión Europea (2010). Directiva 2010/31/UE del parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios.*
- *CTE-DB-HE (2017). Ahorro de energía.*
- *CTE-DB-HS (2017). Salubridad.*

- *INSHT, ERGA - Noticias/4, n° 99 (2007). Notas Prácticas, Confort térmico.*
- *INSHT, NTP 322 (1991). Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT.*
- *INSHT, NTP 501 (1998). Ambiente térmico: inconfort térmico local.*
- *INSHT, NTP 549 (2000). El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior.*
- *RITE (2007). Generación de calor.*
- *UNE-EN-ISO-7726 (2001). Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes física.*
- *UNE-EN-ISO-7730 (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.*
- *UNE-EN-193779 (2008). Ventilación de los edificios no residenciales.*

### Páginas web

- *Aipex - blog (2017). ¿Como pueden las cubiertas ajardinadas ayudar en la lucha contra el cambio climático? . Recuperado de: <http://aipex.es/blog/2017/10/como-pueden-las-cubiertas-ajardinadas-ayudar-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/>*
- *ArchiEXPO (2012). Productos Velux - Lamas de aluminio. Recuperado de: <http://www.archiexpo.es/prod/velux/product-50903-940954.html>*
- *ArchiEXPO (2012). Productos Velux - Ventana de vidrio triple. Recuperado de: <http://www.archiexpo.es/prod/velux/product-50903-940954.html>*
- *Campus energía (2013). Las medidas pasivas de ahorro de energía en edificios. Recuperado de: <http://campusenergia.com/blog/item/139-las-medidas-pasivas-de-ahorro-de-energia-en-edificios/>*
- *Construmática. Construpedia - Cartas bioclimáticas. Recuperado de: [https://www.construmatica.com/construpedia/Cartas\\_Bioclimáticas/](https://www.construmatica.com/construpedia/Cartas_Bioclimáticas/)*
- *Ecoeficiente (2017). Design Builder. Recuperado de: <https://ecoficiente.es/designbuilder/>*
- *El certificador (2012). ¿Qué es la envolvente térmica de un edificio?. Recuperado de: <http://www.elcertificador.com/que-es-la-envolvente-termica-de-un-edificio/>*
- *Edificación bioclimática (2012). El muro trombre. Recuperado de: <https://edificacionbioclimatica.wordpress.com/2012/12/07/el-muro-trombe/>*

- *El tiempo Sevilla* (2015). *El Clima de Sevilla – Clasificación y Aspectos Generales*. Recuperado de: <http://www.eltiemposevilla.es/el-clima-de-sevilla/>
- *Escuela Técnica Superior de Arquitectura* (2019). *Descargas*. Recuperado de: <http://etsa.us.es/descargas/general/planos/etsa/>
- *Espacio elevado al público* (2012). *Asamblea de estudiantes ETSA Sevilla*, 17 de mayo de 2012. Recuperado de: <https://espacioelevadoalpublico.wordpress.com/2012/05/14/asamblea-de-estudiantes-etsa-sevilla-jueves-17-de-mayo-de-2012/>
- *Factorenergía* (2017). *¿Qué es la eficiencia energética?*. Recuperado de: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/que-es-la-eficiencia-energetica/>
- *Favemanc*. *Las ventajas de una fachada ventilada*. Recuperado de: <http://www.favemanc.com/wr-ventajas-fachadas-ventiladas#>
- *Huellas de arquitectura* (2013). *El factor de forma como estrategia de diseño*. Recuperado de: <https://huellasdearquitectura.wordpress.com/2013/05/24/el-factor-de-forma-como-estrategia-de-diseno/>
- *IDAE* (2012). *Guía técnica - Instalaciones de climatización con equipos autónomos*. Recuperado de: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_17\\_Guia\\_tecnica\\_instalaciones\\_de\\_climatizacion\\_con\\_equipos\\_autonomos\\_5bd3407b.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_17_Guia_tecnica_instalaciones_de_climatizacion_con_equipos_autonomos_5bd3407b.pdf)
- *IDAE* (2009). *Estudios, informes y estadísticas*. Recuperado de: <https://www.idae.es/estudios-informes-y-estadisticas/>
- *PCE Ibérica*. *Registrador de CO2 CDL 210*. Recuperado de: <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-registrador/registrator-cdl210.htm>
- *Seicorlan*. *Rehabilitación de fachadas SATE en Donostia San Sebastián*. Recuperado de: <https://seicorlan.com/fachadas-sate-donostia/>
- *Siber ventilación* (2017). *CTE HE 1, Limitación de la demanda energética: una cuestión de normativa*. Recuperado de: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/cte-he-1-limitacion-de-la-demanda-energetica/>
- *Wikipedia* (2017). *Escuela Técnica Superior de Arquitectura*. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Escuela\\_Técnica\\_Superior\\_de\\_Arquitectura\\_de\\_Sevilla/](https://es.wikipedia.org/wiki/Escuela_Técnica_Superior_de_Arquitectura_de_Sevilla/)

# REHABILITACIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS DOCENTES SUPERIORES

---

FERNANDO RUIZ MENCHÉN\_TRABAJO FIN DE GRADO\_GRADO EN FUDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA\_CURSO 2018-19

